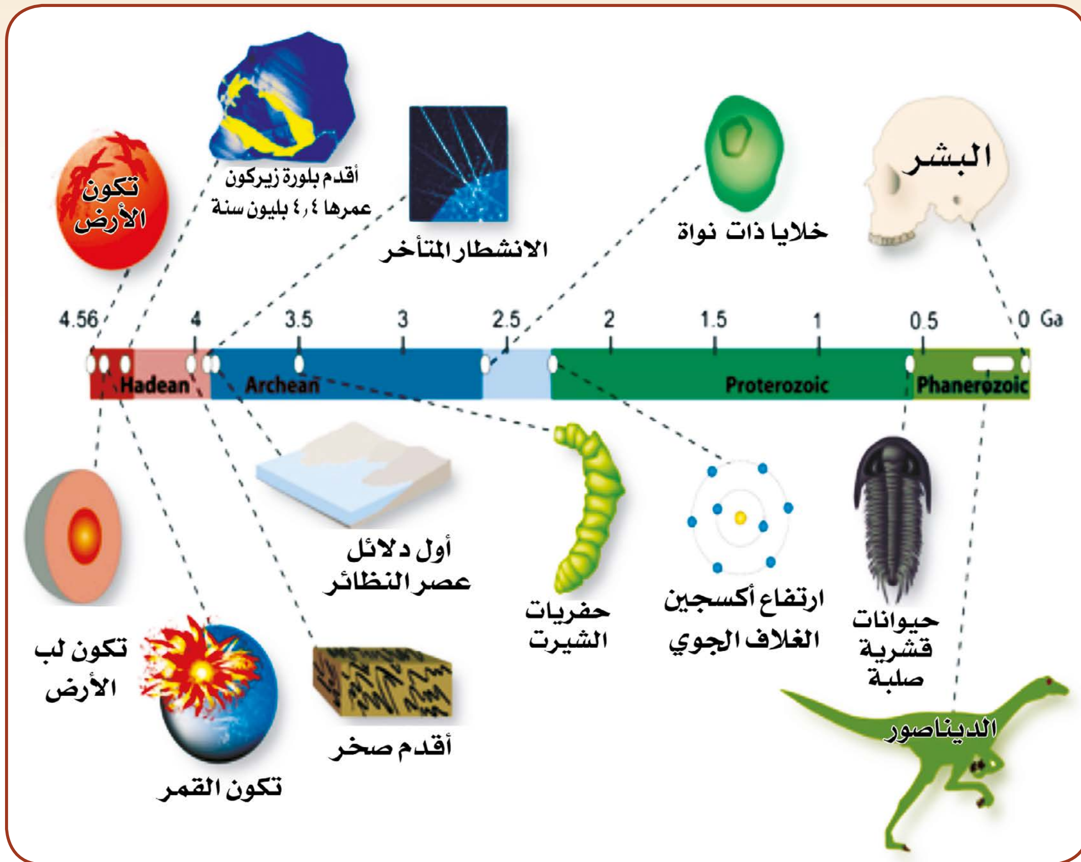
المجلة العربية للعلوم الجيولوجية
Arabian Journal of Geosciences

جامعة الملك سعود
King Saud University

الجمعية السعودية لعلوم الأرض
Saudi Society for Geosciences

Al-Amri's Encyclopedia of Earth Sciences 1 موسوعة العمري في علوم الأرض

تقدير عُمْر الأرض



عبد الله بن محمد العمري
قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - كلية العلوم - جامعة الملك سعود

١٤٤٤هـ - ٢٠٢٣م


www.alamrigeo.com



فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر

العمري ، عبدالله بن محمد سعيد

كتاب تقدير عمر الأرض. / عبدالله بن محمد سعيد العمري - ط١.-

الرياض، ١٤٤٣هـ

١١٤ ص ، ٢١,٥ X ٢٨

ردمك: ٤-٩٩١٥-٠٣-٦٠٣-٩٧٨

١ - الجيوفيزياء ٢ - الأرض أ. العنوان ب. الموسوعة

ديوي ٥٥٠ ٧٦٣٩ / ١٤٤٣

رقم الإيداع ٧٦٣٩ / ١٤٤٣

ردمك: ٤-٩٩١٥-٠٣-٦٠٣-٩٧٨

تطلب النسخة الورقية المجانية من المؤلف على العنوان التالي:

قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود ص.ب 2455 الرياض 11451

الإصدار الإلكتروني من خلال الموقع

www.alamrigeo.com





للاستفسارات والملاحظات الاتصال على:

جوال +966505481215 هاتف +966 11 4676198

البريد الإلكتروني E.mail : alamri.geo@gmail.com

الطبعة الأولى

١٤٤٤هـ / ٢٠٢٣م

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿ وَفِي ٱلْأَرْضِ ءَايَٰتٌ لِّلْمُوقِنِينَ ﴾

[سورة الذاريات : آية 20]

﴿And on the Earth are Signs for Those Whose Faith is Certain﴾


موسوعة العمري في علوم الأرض

تمهيد

الحمد والشكر لله الذي ساعدني في إنجاز هذا الجهد المتواضع المرتبط بتأليف الموسوعة العلمية العربية. تهدف الموسوعة العلمية الشاملة في علوم الأرض والبيئة والطاقة إلى تزويد وخدمة الباحثين وطلاب المدارس والجامعات وفئات المجتمع نظراً لمعاناة المهتمين من مشاكل ندرة المراجع العربية في هذا المجال. تشتمل الموسوعة المجانية والتي تعتبر الأضخم عالمياً على 30 كتاب علمي ثقافي موثق ومدعم بالصور والأشكال التوضيحية المبسطة في 6000 صفحة تقريباً تغطي خمسة أجزاء رئيسية:

الجـــزء الأول مكون من ستة كتب يناقش عمر الأرض وشكلها وحركاتها وتركيبها الداخلي وثرواتها المعدنية والتعدينية والجاذبية الأرضية وعلاقتها بالمد والجزر:

- تقدير عمر الأرض
- التركيب الداخلي للأرض
- شكل الأرض وحركاتها
- المعادن والتعدين
- الجاذبية الأرضية وتطبيقاتها
- المد والجزر

الجـزء الثاني من الموسوعة يشتمل على ستة كتب تربط علاقة الأرض بالنظام الشمسي وبالأخص القمر والأغلفة الجوية والمائية والحيوية المحيطة بالأرض. وكذلك دور الزلازل والتفجيرات والبراكين والتسونامي في التأثير على بنية الأرض وكيفية تقليل مخاطرها:

- موجات التسونامي
- البراكين وسبل مجابهتها
- الزلازل والتفجيرات
- جيولوجية القمر
- تقييم مخاطر الزلازل
- الأغلفة المحيطة بالأرض

الجزء الثالث يتألف من ستة كتب يربط كل ما يتعلق بالمشاكل والكوارث البيئية والطبيعية وحلولها والتغيرات المناخية وأهمية التشجير ومعالجة الاحتباس الحراري:

- المشاكل البيئية وحلولها
- الانزلاقات والإنهيارات والفيضانات
- التغيرات المناخية والاحتباس الحراري
- الأمطار والسيول والسدود
- التشجير: التحديات والحلول
- التصحر والجفاف

الجـزء الرابـع يتكون من ستة كتب يناقش ارتباط علوم الأرض بالعلوم الأخرى نووياً وطبياً، وكذلك دور الطاقة المستدامة النظيفة اقتصادياً وبيئياً:

- مستقبل الطاقة في عالمنا
- الجيوفزياء النووية
- الطاقة الحرارية الأرضية
- الجيولوجيا الطبية
- هل إنتهى عصر النفط؟
- دليل كتابة الرسائل الجامعية والنشر العلمي

أما **الجـزء الخامـس** يتألف من ستة كتب متخصصة في العلوم الجيولوجية مكونة من 2020 سؤال وجواب لمساعدة طلاب الجامعات والباحثين وتهيئتهم للاختبارات الشاملة والتأهيلية للدراسات العليا ومزاولة المهنة:

Q&A	321 سؤال وجواب في تطور الأرض
Q&A	358 سؤال وجواب في علم الصخور والجيوكيمياء والاستشعار عن بُعد وال GIS
Q&A	358 سؤال وجواب في الثروات الطبيعية
Q&A	380 سؤال وجواب في المخاطر الجيولوجية
Q&A	303 سؤال وجواب في علم الزلازل والزلزالية الهندسية
Q&A	300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية

المؤلـــــــف

مُقَدِّمَة

كوكب الأرض هو ثالث أقرب كوكب من الشمس، ويعد خامس أكبر كوكب في المجموعة الشمسية، وهو الكوكب الوحيد حالياً المعروف بأنه يحتوي على الحياة، ويتكون كوكب الأرض من حوالي 71 % من المياه التي تتمثل في المحيطات والبحار والأنهار، ومن حوالي 29 % من اليابسة التي تتكون من القارات الكبيرة والجزر والجبال، كما يغطي الجليد والثلج الكثير من المناطق القطبية للأرض، وبسبب كمية المياه الكبيرة على سطح الأرض، يبدو الكوكب من بعيد باللون الأزرق، ولذلك سُمي بـ (الكوكب الأزرق)، ويحتوي هذا الكوكب على غلاف جوي ساعد على تكوين الحياة على سطحه، حيث يتكون الغلاف الجوي للأرض في الغالب من النيتروجين والأكسجين.

حتى الآن لم يجد العلماء طريقة لتحديد العمر الدقيق للأرض مباشرة من صخور الأرض، لأن أقدم صخور الأرض قد أعيد تدويرها وتدميرها من خلال عملية الصفائح التكتونية. إذا كان هناك أي من صخور الأرض البدائية بقيت في حالتها الأصلية، فلم يتم العثور عليها بعد. ومع ذلك، فقد تمكن العلماء من تحديد العمر المحتمل للنظام الشمسي وحساب عمر الأرض بافتراض أن الأرض وبقية الأجسام الصلبة في النظام الشمسي تشكلت في الوقت نفسه، وبالتالي فهي من نفس العمر.

تشكلت الأرض منذ ما بين 4.5 و 4.6 مليار سنة، في الوقت نفسه الذي كانت فيه الكواكب الأخرى في النظام الشمسي تتشكل. كيف لنا أن نعرف هذا؟ من خلال قياس عمر أقدم الصخور والمعادن على الأرض، والأرض ككل، والنظام الشمسي ككل، والقمر. تتقارب كل هذه الأعمار في عمر الأرض، والنظام الشمسي، بين 4.5 و 4.6 مليار سنة. تم قياس كل هذه الأعمار من خلال تحليل النظائر الإشعاعية مثل U-Pb و Sm-Nd في عينات من الصخور والمعادن - باستثناء عمر الشمس، الذي يعتمد على نماذج نظرية لكيفية تشكل النجوم وتطورها والمستمدة من قوانين الفيزياء.

يميز علماء الجيولوجيا اليوم نوعين من عمر الأرض:

العمرُ المطلقُ: وهو الزمن الذي مضى منذ نشوء كوكب الأرض حتى اليوم، ويحدده العلماء باستخدام الطرائق الإشعاعية. يتم قياس أعمار صخور الأرض والقمر والنيازك من خلال اضمحلال النظائر المشعة طويلة العمر للعناصر التي تحدث بشكل طبيعي في الصخور والمعادن والتي تتحلل بنصف عمر يتراوح بين 700 مليون إلى أكثر من 100 مليار سنة إلى نظائر مستقرة أخرى.

العمرُ النسبيُ: وهو مجموع الأحقاب الجيولوجية التي مرت على الكرة الأرضية أو ما يسمى بـ (التاريخ الجيولوجي للأرض) والتي أدت إلى تكون القشرة الأرضية بالشكل الذي يُرى اليوم بعد تكون كوكب الأرض، ويحدد باستخدام الطرائق التي تعتمد على التغيرات المتتالية في ظروف التعرية والترسيب التي مرت بها الأرض في تاريخها الجيولوجي، مثل: الطريقة المغناطيسية القديمة والطريقة الجيولوجية الحيوية والطريقة الجيولوجية الترسيبية. وقد أفرد العلماء اليوم لهذا الموضوع علماً خاصاً أطلق عليه علم دراسة عمر الأرض Geochronology.

حســاب عمر الأرض عبر التــاريخ

الفـــرس القدمـــاء

في القـرن السـادس قبـل الميـلاد، اعتقـد زرادشـت، وهـو مـدرس دينـي عـاش في بـلاد فـارس (إيـــران)، أن العالـــم كان موجـــوداً منذ أكثر من 12000 عام (Knell & Lewis, 2001).

اليونانيـــــون والرومانيـــــون

اعتقد أرسطو Aristotle (توفي 322 ق.م) أنّ الأرض كانت موجودة منذ الأزل، ويعتقـد الشـاعر الرومانـي لوكريتيوس Lucretius (توفي 55 ق.م) –الوريث الفكري لعلمـاء الـذرة اليونانيـين – أن تشـكيلها يجـب أن يكـون حديثـاً نسـبياً، نظـراً لعـدم وجـود سـجلات تعـود إلـى مـا بعـد حـرب طـروادة (Braterman, 2013).

ويـروي الكاتـب الرومانـي شيشـرون Cicero (تـوفي 43 ق.م) أن كهنـوت الكلـدان الموقـر في بابـل القديمـة كان يؤمـن بـأن الأرض خرجـت مـن الفوضـى قبـل مليونـي عـام، في حـين اعتبـر البراهميـون القدامـى في الهنـد الزمـن والأرض أبديـين.

وبعـد انتشـار المسـيحية، كان «المؤلفـون الموثوقـون» الوحيـدون هـم أولئـك الذيـن يـروون قصصـاً عـن الخلـق. ثـم أصبـح الكتـاب المقـدس، أو بالأحـرى النصـوص التـي كُتـب منهـا، النصـوص التاريخيـة الأوليـة، والمصـادر الرئيسـية لتفسـير الزمـن. يشـير المؤرخـون عمومـاً إلـى البطريـــــــرك الســـــرياني ثيوفيلـــوس الأنطاكي

Theophilus of Antioch (توفي 185م)، وربما كان أول من استخدم السجل الكتابي كمصدر لبناء التسلسل الزمني. ومع ذلك، امتد فن التسلسل الزمني إلى ما قبل العصر المسيحي بفترة طويلة، وغالباً ما اشتق مصطلح «العصور الرائعة» لمئات الآلاف من السنين لحضارات معينة (Knell, & Lewis, 2001).

دور العلماء العرب والمسلمين

يحظى علم الأحافير بأهمية خاصة في الجيولوجيا، إذ يمكن التوصل إلى عمر الصخور من خلال الأحافير الموجودة بداخلها. كما تبين الأحافير أيضاً ما إذا كانت الصخور قد تكونت تحت البحر أو على اليابسة. وقد تكونت معظم الصخور التي تحوي على أصداف بحرية تحت البحر، والتي تحوي على حيوانات أو نباتات برية على اليابسة. ويساعد التعرف على المكان الذي تكونت فيه الصخور العلماء على رسم خريطة للعالم، على النحو الذي كان عليه قبل ملايين السنين.

ظهر مصطلح علم الأحافير Paleontology واستخدم ليشمل دراسة النباتات والحيوانات الأحفورية، من قبل فيشر دي فالدهايم في عمله (Bibliographia PalCeontologica). يسمى العلم الذي يدرس الأحافير بعلم الإحاثة أو علم الأحافير أو علم المتحجّرات، وهو الدراسة العلمية للحيوانات والنباتات والكائنات الحية التي عاشت في عصور ما قبل التاريخ. وتوجد بقايا الأحافير للكائنات في الصخور الرسوبية (الصخور التي تكونت نتيجة لترسب المادة المعدنية بعيداً عن الهواء أو الثلج أو الماء). والأحافير التي نجدها اليوم

كانت حية عندما كانت الصخور في طور التكوين، ومن ثَمَّ دُفنت وحفظت بسبب تراكم طبقات الصخور. وبدراسة الأحافير يصل علماء الإحاثة إلى نوع الحياة التي كانت سائدةً في مختلف الحقب التاريخية للأرض.

قد لا يعلم الكثير ممن يتكلمون لغة الضاد أن أصل كلمة (الماموث) قد اشتق من الكلمة العربية البَهْمُوث Behemoth (التي تشير لكل مخلوقٍ ضخم وهائل الحجم)، وعندما وصل التجار العرب (بين القرنين التاسع والعاشر للميلاد) إلى شمال آسيا ورأوا البقايا العملاقة لحيوان مجهول العظام والأسنان أطلقوا عليه اسم (البَهْمُوث).

أشار ابن سينا (توفي 428هـ/ 1037م) في كتابه (الشفاء) إلى العمليات التي تتشكل فيها الحفريات Fossilization، قال ابن سينا: «وإن كان ما يحكى من تحجر حيوانات ونبات صحيحاً، فالسبب فيه شدة قوة معدنية محجّرة تحدث في بعض البقاع الحجرية، أو تنفصل دفعة من الأرض في الزلازل والخسوف، فتحجر ما تلقاه. فإنه ليس استحالة الأجسام النباتية والحيوانية إلى الحجرية، أبعد من استحالة المياه، ولا من الممتنع في المركبات أن تغلب عليها قوة عنصر واحد يستحيل إليه». (ابن سينا، الشفاء، الطبيعيات).

تكلم أبو الريحان البيروني (توفي 440هـ/ 1048م) في كتابه (تحديد نهايات الأماكن في تصحيح مسافات المساكن) عن الأسماك والنباتات المتحجرة، إذْ قال: «وقد ذكر أبو العباس الإيرانشهري (القرن 3هـ/ 9م)، أنه شاهد بقلعة تعرف بـ (البيضاء)، على فرسخ من السيرجان من مدن كرمان، أصول نخيلٍ قد كانت بها فصرد (اشتدت برودته) الموضع وذهب نخيله وجفت، ولم يكن في ذلك حوله

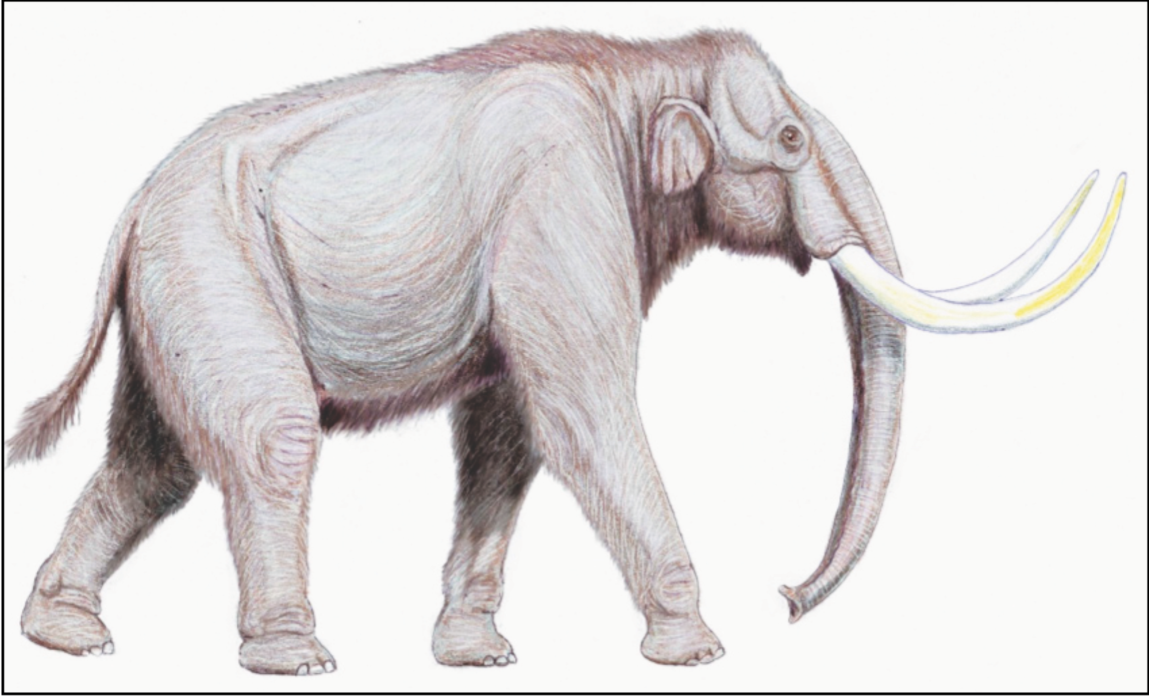
بعشـرين فرسـخاً نخيـل، وزاد الأمـر بيانـاً أنـه لما عـلا الموضـع غـار حواليـه قُنِـيٌّ وأنهار كانت تجـري مـن قبل. وعلـى مثله ينتقل البحـر إلـى البـرِّ والبـرَّ إلـى البحـر، في أزمنـة: إن كانت قبل كون النـاس في العالـم فغير معلومـة، وإن كانـت بعده فغيـر محفوظةً؛ لأن الأخبـار تنقطع إذا طـال عليها الأمد، وبخاصـةً في الأشـياء الكائنة جزءاً بعد جزء، وبحيث لا يفطن لها إلا الخـواص. فهذه باديـة العرب وقد كانت بحـراً فانكبس، حتـى إنّ آثار ذلك ظاهـرة عنـد حفـر الآبـار والحيـاض بهـا، فإنهـا تبـدي أطباقـاً مـن تـراب ورمـال ورضـراض، ثـم يوجـد فيهـا مـن الخـزف والزجـاج والعظـام مـا يمتنـع أن يُحمـل علـى دفـن قاصـد إياهـا هنـاك، بـل يخـرج منهـا أحجـار إذا كسـرت كانـت مشـتملة علـى أصـداف وودع ومـا يسـمى (آذان السـمك)، إمـا باقيـة فيهـا علـى حالهـا، وإمـا باليـة قـد تلاشـت وبقـيٍ مكانهـا خـلاء متشـكلاً بشـكلها، كمـا يوجـد مثلـه ببـاب الأبـواب (مدينـة دربنـت حاليـاً) علـى سـاحل بحـر الخـزر (بحـر قزويـن) (البيرونـي، تحديـد نهايـات الأماكـن).



بقايا لأحفورة شجرة صنوبر في الغابة المتحجرة في المتنزه الوطني الأمريكي. وقد كانت تنتشر في السهول المغمورة بالمياه في العصر الترياسي، وهو عصر ظهور الزواحف والثدييات قبل 225 مليون سنة. هذه الحالة تشبه ما تكلم عنه أبو العباس الإيرانشهري. (يعقوب، 1995م)

لقد أشار **أبو حامد الغرناطي** لاكتشافه لعظام الماموث لدى قيامه بالترحال نحو شمال أوربا نحو بلاد البلغار الباردة جداً التي وصلها في عام (545هـ/ 1150م). (**أبو حامد الغرناطي**، تحفة الألباب ونخبة الإعجاب، مخطوطة مكتبة غوته، برلين، رقم (Ms. Orient. A 1502)، ص 118). تعدّ إشارة الجغرافي العربي **أبو حامد الغرناطي** لعظام فيل الماموث منذ القرن (6هـ/ 13م) إسهاماً علمياً مهماً في تاريخ علم الأحافير والتاريخ الطبيعي، إذْ حاول تفسير وجودها ونسبتها إلى مخلوق مجهول الهوية، في حين كان يسود في أوربا - في الوقت نفسه - نمط من التفكير الغيبي؛ فقد كانوا ينظرون إلى هذه الأحافير على أنّها مخلوقاتٌ

تعرّضت لغضب الله فمسخها حجراً، أو أنّها بقايا الكائنات الحية التي تعرضت لطوفان نوح عليه السلام. وقد يفسّر لنا هذا سبب تأخر دراسة عظام الماموث علمياً عند الأوربيين حتى القرن الثامن عشر للميلاد، في عام 1722م، حيث جرى تصنيفه وتحديد نوعه.



قد يكون نوع عظام الماموث التي عثر عليها الغرناطي تعود لماموث السهوب Steppe Mammoth المنقرض. فقد انتشر هذا النوع كثيراً في معظم شمال أوراسيا خلال البليستوسين الأوسط، منذ 370,000-600,000 سنة مضت، من المحتمل أن يكون ظهر في سيبيريا خلال البليستوسين المبكر من الماموث الجنوبي، كان واحداً من أكبر أنواع رتبة الخرطوميات وقد يكون الأكبر.

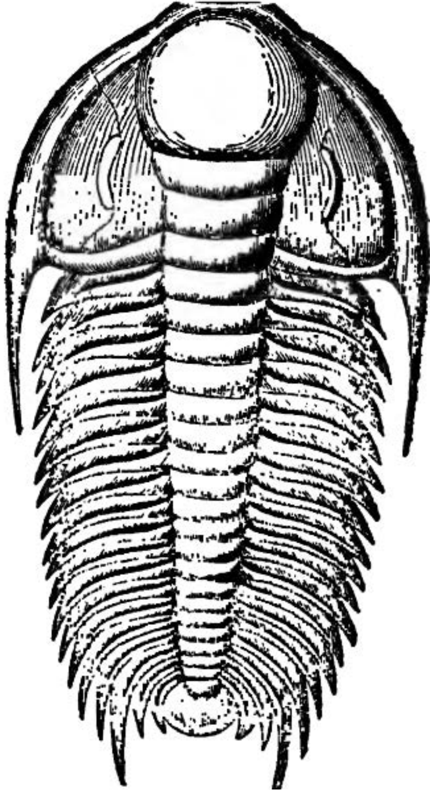
(https://en.wikipedia.org/wiki/Steppe_mammoth)

تناول زكريا بن محمد بن محمود القزويني (توفي 682هـ / 1283م) في كتابه (عجائب المخلوقات وغرائب الموجودات) العلاقة بين الأحافير والتتابع الطبقي والتزامن فيما بينها. قال القزويني: «وأما صيرورة الجبال سهولاً، فإن الجبال من شدة إشراق الشمس والقمر وسائر الكواكب عليها بطول الزمان تنشف رطوبتها وتزداد يبساً وجفافاً وتتكسر خاصةً عند الصواعق فتصير أحجاراً وصخوراً ورمالاً، ثم إن السهول يحملها إلى بطون الأنهار والأودية ثم تحملها بشدة جريانها إلى البحار فتنبسط في قعرها ساقاً بعد ساق بطول الزمان، ويتلبد بعضها فوق بعض فيحصل في البحار جبال وتلال كما يتلبد من هبوب الرياح دعاص الرمل في البرد، ولذلك قد يوجد في جوف الأحجار إذا كسرت صدفة أو عظم، وذلك بسبب اختلاط طين هذا الموضع بالصدف والعظم وقد يصير البحر يبساً واليبس بحراً».

أشار ابن فضل الله العمري (توفي 749هـ / 1349م) إلى انتشار الأحافير وكيفية تشكلها: «وكذلك قد يوجد في أجواف الأحجار إذا كسرت، أنواع من الأصداف والعظام، وذلك بسبب اختلاط طين هذا الموضع بالصدف والعظم؛ وأيضا فقد يوجد بعض الجبال ذو أطباق، بعضها فوق بعض، وسبب ذلك وصول السيول إليه بالطين مرة، فإن ماء السيل إذا انتقل من موضع إلى موضع يحمل طين الموضع الذي مرّ عليه، فتصير كل طبقة من ذلك بمرور الزمان حجراً بالسبب الذي قلنا، ولا تزال السيول تأخذ من الجبال وتحط حتى ترتفع من البحر الوهاد وتنخفض في البر الجبال والله أعلم بالحقائق» (العمري، مسالك الأبصار، 2010م).



المستحاثات العملاقة عريضات الأجنحة
(https://en.wikipedia.org/wiki/Eurypterid)




مفصلي ثلاثي الفصوص Trilobite؛ الفترة الكامبرية. هي مجموعة من المفصليات البحرية المنقرضة التي تشكل فئة Trilobita. تشكل ثلاثية الفصوص واحدة من أقدم مجموعات المفصليات المعروفة. يُحدِّد الظهور الأول لثلاثيات الفصوص في السجل الأحفوري قاعدة المرحلة الأتبانية من العصر الكمبري المبكر (قبل 521 مليون سنة)، وازدهرت في جميع أنحاء العصر الباليوزوي السفلي قبل الانزلاق إلى تدهور طويل، عندما كانت جميعها ثلاثية الفصوص، خلال العصر الديفوني. أوامر باستثناء البرويتيات Proetida ماتت. اختفت آخر ثلاثيات الفصوص أخيرًا في الانقراض الجماعي في نهاية العصر البرمي منذ حوالي 252 مليون سنة. كانت ثلاثية الفصوص من بين أكثر الحيوانات الأولى نجاحًا، حيث كانت موجودة في المحيطات لما يقرب من 270 مليون سنة، مع أكثر من 20000 نوع تم وصفها.

(https://en.wikipedia.org/wiki/Trilobite)

نجـــد في العديـــد من النصـــوص العربيـــة الإســـلامية الدينية المبكّرة إشـــاراتٍ إلـى تقديـر الحيـاة علـى الأرض، فقـد ورد في كتـاب (أخبـار الزمـان) لمؤلفه علـي بن الحسـين بن علي المسـعودي (توفي 346هـ / 957م) أورد ما قاله أهـل الأثـر مـن أنّ «عمـر الزمـان إلـى آدام عليه السلام سـبعة آلاف منـه، ورواية محمد بن جرير الطبـري على ما قدمنـاه ذكره أنه من آدم إلـى انقضـاء الخلق سـبعة آلاف» (المسـعودي، أخبـار الزمـان).

وقـد أشـار أبو الريحـان البيروني (توفي 440هـ/ 1048م) إلـى إمكانيـة تحديد عمـر الأرض مـن خـلال التغيـرات الجيولوجيـة التـي تلحـق بالصخـور علـى مـرّ العصـور، وقـد شـعر بـأن المعلومـات التـي بـين يديـه ليسـت كافيـة لتحديـد هـذا العمـر بدقـة، حيـث قـال: «ولا نعلـم مـن أحوالهـا إلا مـا يُشـاهد مـن الآثـار التـي تحتاج إلـى حصولها إلـى مددٍ طويلة وإن تناهـت في الطرفين، كالجبال الشـامخة المتركبـة مـن الرَّضْـراضُ (الحصـى الصِّغـار) الملـس، المختلفـة الألـوان، المؤتلفـة بالطين والرمل المتحجرين عليها. فإنّ من تأمّل الأمـر من وجهه وأتاه بابه علم أن الرضـراض والحصـى هـي حجـارة تتكسـر مـن الجبـال بالانصـداع والانصـدام، ثم يكثر عليهـا جري الماء وهبوب الرياح، ويدوم احتكاكها فتبلـى ويأخـذ البلـى فيها مـن جهـة زواياهـا وحروفهـا حتـى يذهـب بهـا فيدملكهـا (يملّسـها ويدوّرهـا)، وأنّ الفتـات التـي تتميـز عنهـا هـي الرمـال ثم التـراب، وأنّ ذلـك الرضـراض لما اجتمع في مسـائل الأوديـة حتـى انكبسـت بهـا، وتخللهـا الرمـال والتـراب فانعجنـت بهـا واندفنـت فيهـا وعلتهـا السـيول، فصـارت في القـرار والعمـق بعـد إن كانـت مـن وجه الأرض فـوق تحجـرت بالبـرد؛ لأن تحجـر أكثـر الجبـال في الأعمـاق بالبـرد، ولذلـك تـذوب الأحجـار بتسـليط النـار .. وإنّ وجدنـا جبـلاً متجبـلاً مـن هـذه الحجـارات

المُلس – وما أكثره فيما بينها – علمنا أنّ تكوّنه على ما وصفناه، وأنه تردد سافلاً مرة وعالياً أخرى. وكل تلك الأحوال بالضرورة ذوات أزمان مديدة غير مضبوطة الكمية، وتحت تغايير غير معلومة الكيفية» (الفندي، وأحمد، 1968م).

في الواقع يشير نص البيروني السابق إلى قانون (الوتيرة الواحدة أو وحدة التناسق Doctrine of Uniformitarianism) قبل أن يشير إليه جيمس هوتون J. Hutton (توفي 1797م) ؛ لأنه يرى أنّ ظروف تشكل الصخور متشابهة، وبالتالي يمكننا استنتاج عمر التكوينات القديمة من خلال مراقبة الزمن اللازم لتشكل طبقات حديثة (ضاي، 1994م).

وفي رسالة متأخرة خصصها الشيخ جلال الدين التي تحمل عنوان: (رسالة في بيان عمر الدنيا) والمكتوبة باللغة التركية، نجده يحاول أن يورد كل الأحاديث الموثوقة المتعلقة بتحديد عمر الأرض منذ أن خلقت إلى أن تفنى 7000 سنة (جلال الدين، مخطوطة محفوظة في قونيا، المكتبة الإقليمية برقم (6172)، ص 275-279). ويبدو أن الشيخ جلال الدين اعتمد ما سبق وذكره المسعودي.

الأوربيـــــون والأمريكيـــــون

في ستينيات القرن السادس عشر، صاغ نيكولاس ستينو N. Steno (توفي 1686م) مفاهيمنا الحديثة لترسب الطبقات الأفقية، لقد استنتج أنه عندما لا تكون الطبقات أفقية، يجب أن تكون مائلةً منذ ترسبها ولاحظ أن الطبقات المختلفة تحوي على أنواع مختلفة من الأحافير. اقترح روبرت هوك R. Hooke (توفي 1703م)، بعد فترة ليستْ بالطويلة، بأنّ سجل الحفريات سيشكل أساساً لتسلسل زمني من شأنه

أن «يعود إلى ما قبل .. حتى الأهرامات ذاتها» (Braterman, 2013).

وبحسب الباحث الفرنسي هوبير كريفين H. Krivine فقد اقترح 17 عمر للأرض بين سنتي 1860م و1909م، التي تتراوح قيمها بين 3526 سنة و1526 ملايين من السنين. ناهيك عن الأعمار التي جرى اقتراحها منذ القرن 17م. والتي قد تبدأ من الفلكي يوهانس كيبلر J. Kepler (توفي 1630م) الذي قدّر عمر الأرض بـ (3993 سنة قبل الميلاد)، ثم لدينا تقدير رئيس أساقفة الأنكليكان في أيرلندا جيمس أوشر J. Ussher (توفي 1656م) وهو مُوَقّت الكتاب المقدس الذي يُستشهد به كثيراً، وقد اقترح عام 1654م أنّ عمر الأرض يجب أن يكون 4004 سنة قبل الميلاد، معتمداً في ذلك على أعمار البطاركة والشخصيات التوراتية (رونن، 1990م)، ابتداءً من المسيح عودة إلى آدام، وقد حدد أن لحظة الخلق حدثــت الساعة 9 صباحاً بتوقيت ما بين النهرين يوم 26 أكتوبر، عام 4004 ق.م، حسب التقويم اليولياني، وهو كما نلاحظ مبني على الخيال أكثر منه على قاعدة علمية سواء في الحساب أو الرصد والمشاهدة (جريبين، 2008م). وقد نُشر هذا الرقم في نسخ الكتاب المقدس الإنجليزية التي سُمح بقراءتها حتى بداية القرن العشرين الميلادي.

لقد طرح الفرنسي جورج لكليرك، أو الكونت دي بوفــون Comte de Buffon (توفي 1788م) فقد فكرةً شاملةً تربط بين عمر الأرض والنماذج الكونية التي قدمها كلٌ مــن إيمانويل كانــط I. Kant (توفي 1804م) وبيير ســيمون لابلاس P. S. Laplace (توفي 1827م) حول تشكل الأرض والشمس وغيرهما من أجرام المجموعة الشمسية، وقد كان بوفون مقتنعاً أنّ الأرض كانت عبارةً عن كتلة منصهرة وحارة بشكل كبير، ثم أخذت بالتبريد بشكل تدريجي سمح بظهور التضاريس الأرضية، وهنا حاول بوفون أن يضع مقياساً زمنياً لهذه المراحل، فقد اعتقد أنّ التبريد الأولي امتد لفترة زمنية مقدارها 3000 سنة، أما فترة تكون الفجوات والمنخفضات فقد

استغرقت عشرة أضعاف هذا الوقت، بعد ذلك استغرق تبريد المحيط الأولي وتكوين الرواسب الطينية وظهور الحياة البدائية في البحر نحو 25000 سنة. يضاف إلى ذلك فترة 10000 سنة فترة تصريف جزءٍ من ماء المحيط وظهور النباتات، وفترة انفصال القارات الذي استغرق 5000 سنةً، وظهور الإنسان 5000 سنة، فيصبح المجموع 78 ألف سنة (رونن، 1990م).

بتأثّر من كتاب الفيزيائي البريطاني إسحق نيوتن I. Newton (توفي 1727م) (المبادئ) الذي أشار إلى أن كرة حديد بحجم كوكب الأرض قد تستغرق 50 ألف سنة حتى تبرد، قام بوفون بإجراء تجاربٍ على كُرات من الحديد ومواد أخرى بأحجام مختلفة، ورُصد الزمن الذي تستغرقه كل منها حتى تبرد من درجة التوهّج. وهذا ما جعله يقترح أن عمر الأرض 78 ألف سنة. ويبدو أن هذه القيمة لم تعجب الفيزيائي الفرنسي جان فورييه J. Fourier (توفي 1830م) الذي انتقل إلى مستوى آخر في حساب قيمة عمر الأرض، فقد حاول فورريه تطوير المعادلات الرياضياتية والقوانين المتعلقة بتوصيف معدّل تشرّب الحرارة من جسم ما، واستخدم هذه المعادلات لحساب الزمن الذي يمكن أن تكون فيه الأرض قد اَستغرقته حتى تبرد. وفي عام 1820م كتب فورييه معادلة عمر الأرض تعتمد على هذه الفكرة، وقد استنتج أن عمر الأرض 100 مليون سنة (جريبين، 2008م).

بحلول الوقت الذي نُشر فيه كتاب (المبادئ) الذي حظي بترحيب كبير وشعبية لتشارلز لايل Ch. Lyell (توفي 1875م) في ثلاثينيات القرن التاسع عشر، اختفت إلى حد كبير النظرية النبتونية Neptunism [النظرية الخاطئة التي تقول إنّ الصخور مثل الغرانيت تشكلت عن طريق التبلور من مياه المحيط البدائي، وقد كان المدافع الرئيس عن هذه النظرية هو أبراهام جوتلوب ويرنر A. G. Werner (توفي 1817م)] بصفتها نظرية جيولوجية قابلة للتطبيق. ومع ذلك، بعد ذلك بوقت

قصير، نشأ جدل جديد قوي بين الفيزيائي الشهير وعالم الرياضيات اللورد كلفن (وليام طومسون) وأتباع لايل، بمن فيهم تشارلز داروين.

اعتقد هؤلاء الجيولوجيون وعلماء الأحياء البارزون، كما فعل جيمس هوتون، أن العمليات الجارية اليوم يمكن أن تفسر تطور الأرض دون التسبب في أحداث أكثر كثافة أو كارثية - طالما كان هناك وقت كاف. وقد اتهم العديد من أتباع هوتون بالاعتراف بوقت غير محدود جزئياً بناءً على الجملة الأخيرة من ورقته البحثية عام 1788م حيث قال: «لا توجد بقايا بداية ولا أمل في النهاية».

أما في مقالته (حول التبريد العالمي للأرض) عام 1864م، استخدم كلفن قوانين الفرنسي جوزيف فورييه J. Fourier (توفي 1830م) للتوصيل الحراري لحساب أن عمر الأرض يتراوح بين 20 مليون و 400 مليون سنة؛ كان النطاق العمري الكبير بسبب نقص المعلومات حول الخصائص الحرارية للصخور في أعماق الأرض في ذلك الوقت. كان كلفن قد قام في وقت سابق بحساب عمر الشمس، بافتراض (غير صحيح) أن طاقتها جاءت من تراكم الجاذبية، ووصلت إلى عمر نحو 20 مليون سنة. في حين أن طاقة الشمس تأتي من الاندماج النووي، ولكن لم يتعرّف على ذلك حتى ثلاثينيات القرن العشرين.

كان الاتفاق بين عمر كلفن للشمس والأرض (بالنسبة للفئة العمرية الأدنى) محض صدفة، لكنه أنتج أحد أكثر الخلافات العلمية سخونة في القرن التاسع عشر. استند تقدير كلفن لعمر الأرض (والشمس معها) إلى رياضيات أنيقة وقدمها أكثر علماء الفيزياء موثوقية في عصره، وكان له تأثير عميق على الجيولوجيا. عندها كان لدى الجيولوجيين مشكلتان كبيرتان، عدم وجود وقت كافٍ لحساب السجل الرسوبي، وأن عقيدة لايل في الوتيرة الواحدة Uniformitarian تناقض القانون الثاني للديناميكا الحرارية (O'Hara, 2018).

كان خلاف كلفن مع مدرسة لايل عن الوتيرة الواحدة في النصف الأخير من القرن التاسع عشر حول كيفية تعارض القانون الثاني للديناميكا الحرارية مع الوتيرة الواحدة للعمليات الجيولوجية كما كان حول عمر الأرض.

يشير الجزء الأول من ورقة كلفن لعام 1864م إلى أن حلول فورييه «الجميلة» لقوانين تدفق الحرارة أظهرت أن الحرارة تتبدد وتصبح درجات الحرارة موحدة مع مرور الوقت. من بين بيانات القانون الثاني للديناميكا الحرارية، وفقاً للعالم الفرنسي رودولف كلوسيوس R. Clausius (توفي 1888م)، أن الحرارة تتدفق من الأجسام الساخنة إلى الباردة.

بناءً على هذا البيان، يجب أن تفقد الأرض الحرارة؛ لأن درجة الحرارة في الأرض تزداد مع العمق؛ وبالتالي، يجب أن يكون تدفق الحرارة إلى الخارج في الفضاء، بافتراض عدم وجود مصدر حرارة داخلي كيميائي، وهو ما اعتقد كلفن أنه غير محتمل؛ لذلك يجب أن يكون النشاط الجوي والبركاني في الماضي أكثر نشاطًا بدلاً من أن يكون موحدًا طوال الوقت. في ورقة عام 1864م، أخذ كلفن تشارلز لايل مهمة لشرح الحرارة الجوفية والعمل الجوي بواسطة فرضية كيميائية: «عندما تتحد المواد معاً، يمكن فصلها كهربائيا مرة أخرى بواسطة التيارات الحرارية الكيميائية بسبب الحرارة الناتجة عن توليفها، وبالتالي يستمر العمل الكيميائي وحرارتها في دورة لا نهاية لها، ينتهك مبادئ الفلسفة الطبيعية».

علاوة على ذلك، يتمتع كلفن ببعض المرح على حساب ليل بالقول إن هذا هو نفس الطريقة التي «يمكن للساعة المصممة بحركة ذاتية الملء أن تحقق توقعات مخترعها العبقري من خلال الاستمرار إلى الأبد». بعبارة أخرى، هناك لا يوجد شيء مثل آلة الحركة الدائمة الميكانيكية أو الكهربائية.

بعد ثلاثة وثلاثين عاماً، كرر كلفن هذا النقد نفسه حرفياً في ورقته الثانية عام 1897م عن عمر الأرض، مشيراً إلى أنه، في رأيه، لم يتغير الكثير بين الجيولوجيين. صاغ كلفن بيانه الخاص بالقانون الثاني للديناميكا الحرارية (يعادل ذلك الذي وضعه كلوسيوس)، أي: لا يمكن امتصاص الحرارة من الخزان الساخن وتحويله بالكامل إلى العمل دون فقدان بعض الحرارة إلى خزان أكثر برودة (البيئة على سبيل المثال).

يوضح بيان القانون هذا أن آلات الحركة الدائمة مستحيلة لأن بعضاً من الطاقة يضيع دائماً. على الرغم من أن القانون الأول للديناميكا الحرارية ينص على أن الحرارة والعمل متكافئان ويمكن تحويلهما من أحدهما إلى الآخر، فإن القانون الثاني يفرض تحذيراً أو قيداً على القانون الأول الذي يحد من تحويل الحرارة إلى العمل. هذا النشاط الإشعاعي (مع أنه لم يكتشف بعد في وقت طرح هذه الحجج) قدم مصدراً داخلياً للحرارة للأرض لا يبطل القانون الثاني، لكنه يغير التحليل الكمي بشكل كبير (O’Hara, 2018).

لكن لم يستفسر كل مراقبي الجيولوجيا عن الزمن. كثير من الجيولوجيين - أمثال وليم سميث W. Smith (توفي 1839م) - يكسبون لقمة عيشهم ببساطة من معرفتهم العملية به، مع أن ابن أخيه، جون فيليبس J. Phillips (توفي 1847م)، كان من أوائل الجيولوجيين الذين حاولوا تحديد عمر رقمي للأرض من معدلات ترسب الرواسب. لأكثر من خمسين عاماً، سادت الاختلافات في هذه الطريقة كأداة الجيولوجيا الرئيسية لتأريخ الأرض، بينما قيد الفيزيائيون المتطلبات لمقياس زمني طويل بتقديرات أكثر صرامة وانحداراً عن الشمس والأرض الباردة (Knell, & Lewis, 2001).

كلفــــن وعمـــــــر الأرض

في حين أشار الجزء الأول من ورقة كلفن المهمة لعام 1864م إلى تناقض وجهة النظر عن الوتيرة الواحدة مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية، ركز الجزء الثاني على حل فورييه لمعادلة التدفق الحراري لحساب عمر الأرض. وفقاً لنظرية غوتفريد فيلهلم لايبنيز G. W. Leibniz (توفي 1716م) السابقة بأن الأرض كانت في البداية عبارة عن كرة متوهجة ساخنة جرى تبريدها لتشكيل قشرة بلّورية، قام كلفن بحساب الوقت اللازم لقشرة الأرض للوصول إلى التدرج الحراري الأرضي الحالي. عندما تبرد الأرض، سينخفض التدرج الحراري الأرضي تدريجياً للوصول إلى قيمته الحالية؛ قدّر كلفن الوقت اللازم لحدوث ذلك، بافتراض عدم وجود مصدر حرارة داخلي.

احتاج كلفن إلى ثلاثة مقادير لحسابها: درجة الحرارة الأولية للأرض. الموصلية الحرارية والسعة الحرارية للصخور، وكيف يمكن أن تختلف كدالة للعمق؛ والتدرج الحراري الأرضي. بالنسبة للتدرج الحراري الأرضي، اختار 1 درجة فهرنهايت لكل 50 قدماً (نحو 35 درجة مئوية / كم) بناءً على قياسات القشرة القارية (هذا الرقم لا ينطبق على قشرة المحيط، التي لم يكن معروفاً عنها إلا القليل في ذلك الوقت).

لقد أجرى قياساته الخاصة في وقت سابق على التوصيل الحراري للصخور واستخدم متوسط القيمة 400 قدم مربع / سنة (1.2×10^{-6} متر مربع / ثانية) والذي لا يزال يستخدمه الباحثون الحديثون للصخور المتوسطة. كان تقديره لدرجة الحرارة الأولية للأرض 7000 درجة فهرنهايت (3870 درجة مئوية)،

وقد كانت مرتفعة جداً. أدى النطاق الكبير المحتمل في هذه المتغيرات إلى اتخاذ كلفن نهجاً متحفظاً، وخلص في النهاية إلى أن الأرض كانت في نطاق واسع يتراوح من 20 مليون إلى 400 مليون سنة.

كما لوحظ بالفعل، تزامن الحد الأدنى أيضاً مع تقديره السابق لعمر الشمس. من الواضح أن الأرض لا يمكن أن تكون أقدم من الشمس، لذلك وضع هذا الحد الأقصى للعمر 20 مليون سنة على الأرض. في كتابه أصل الأنواع (1859)، قدر داروين أن تعرية التكوينات في جنوب إنجلترا تطلب 300 مليون سنة، لكنه أزال هذا الحساب لاحقاً من طبعته الثانية. وضع عمل كلفن كلاً من الجيولوجيين وعلماء الأحياء في مأزق حيث احتاج داروين أيضاً إلى الكثير من الوقت لنظريته الخاصة عن الانتقاء الطبيعي.

أجري تقدير ثانٍ لعمر الأرض بوساطة عالم جيولوجي أمريكي، لقد تأسست هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية في عام 1878م، وكان أول مدير لها هو كلارنس كينغ C. King (توفي 1901م)، الذي كانت فترة عمله في هيئة المسح الجيولوجي قصيرة لأن العمل الإداري لم يكن يرضيه. ترك المسح بعد ثلاث سنوات في عام 1881م واتجه إلى مشاريع التعدين والأعمال الاستشارية. ومع ذلك، كان جيولوجياً يحظى باحترام كبير وانتُخب في الأكاديمية الوطنية للعلوم في عام 1876م. وأثناء عمله في المسح، أنشأ مختبر جيوفيزيائي لإجراء قياسات الضغط ودرجة الحرارة على عينات الصخور.

يبدو أن كينغ كان لديه خطة محددة تماماً، فقد كان مهتماً بتقييد النطاق العمري الواسع الذي اقترحه كلفن للأرض في ورقته البحثية عام 1864م، لكن

كينغ كان يعلم أنه يحتاج إلى بيانات إضافية حول سلوك الصخور المصهورة في أعماق الأرض لإحراز مزيد من التقدم. وظف كينغ خريج دكتوراه حديث العهد هو كارل باروس C. Barus (توفي 1935م)، لإجراء تجارب الصخور، واتفقا على أن ينشر باروس النتائج بشكل مستقل بينما سيفسر كينغ الأهمية الجيولوجية للبيانات.

نشر باروس بيانات عن خصائص انصهار الدياباز Diabase، وهي صخرة ذات تكوين بازلتي، يُعتقد أنها تمثل باطن الأرض في ذلك الوقت. أنهى إحدى مساهماته في البيانات المنشورة بالتعليق التالي: «إن التأثير الفوري لكل هذا على الفرضية الجيولوجية للسيد كلارنس كينغ قد حان حالياً للإعلان عنه».

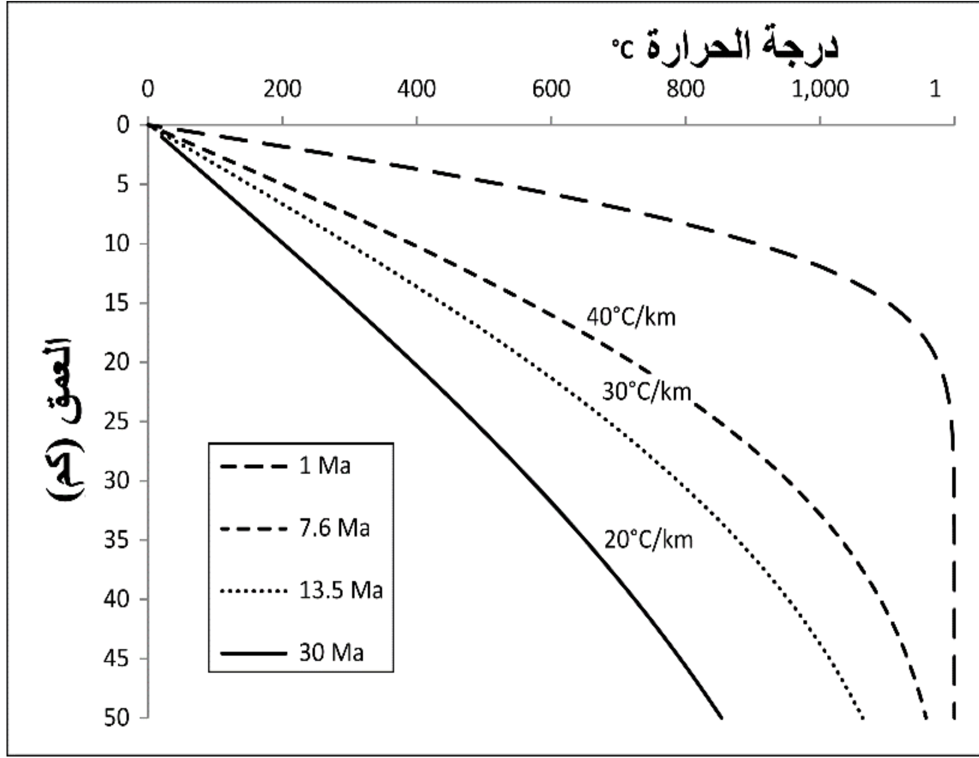
لقد تابع كينغ بالفعل بورقة بعنوان (عمر الأرض)، مستخدماً بيانات باروس الجديدة في عام 1893م. وكانت نقطة انطلاقه في الورقة هي استنتاج كلفن، وآخرون قبله، أن الأرض تتمتع بصلابة عالية مثل الفولاذ، وبالتالي منع وجود كمية كبيرة من السائل في العمق. استخدم بيانات باروس حول سلوك انصهار صخر الدياباز، الذي تبلغ درجة حرارة انصهاره 1200 درجة مئوية على السطح ولكنه يرتفع إلى نحو 4000 درجة مئوية في العمق، وفقاً لحسابات باروس.

أظهر كينغ أن منحنى التبريد لكلفن لمدة 100 مليون عام يقع على الجانب السائل من منحنى انصهار الدياباز، الذي كان غير متسق مع الأرض شديدة الصلابة. وخلص إلى أن 24 مليون سنة هو الحد الأقصى لعمر الأرض منذ أن وقع هذا المنحنى على الجانب الصلب لمنحنى انصهار الدياباز. وافق كلفن، في ورقته البحثية الثانية عن عمر الأرض، مع حسابات كينغ، وخلص كلفن إلى

القول: «لا أختلف كثيراً عن تقديره [كينغ] البالغ 24 مليون سنة سيكون من غير المستحسن نشر أي تقدير أقرب». بدلاً من أن يكون النطاق من 20 مليون إلى 400 مليون سنة كما في ورقة 1864م، كان الحد الأقصى للعمر حالياً في الطرف الأدنى من هذا النطاق.

كتوضيح لبعض جوانب نماذج كلفن (1864) وكينغ (1893)، بناءً على حل فورييه، يوضح الشكل ادناه منحنيات تبريد مختلفة لمادة صلبة شبه لا نهائية بدرجة حرارة أولية تبلغ 1200 درجة مئوية (يستخدمها كينغ) وسطح درجة حرارة 0 درجة مئوية. المتغيرات الأخرى هي نفسها التي يستخدمها كلفن.

تقابل منحنيات التبريد عند 30 مليون و 13.5 مليون و 7.6 مليون سنة تدرجات حرارة أرضية قريبة من السطح تبلغ 20 و 30 و 40 درجة مئوية / كم، على التوالي. تتوافق التدرجات الحرارية الجوفية بين 20 درجة مئوية / كم و 40 درجة مئوية / كم مع أعمار الأرض من 7.6 إلى 30 مليون سنة، وهو ما يتوافق مع تقدير كلفن وكينغ المتوسط لنحو 24 مليون سنة (O’Hara, 2018).



منحنيات تبريد للأرض بدون مصدر حرارة داخلي يعتمد على تبريد مادة صلبة شبه لانهائية مبدئيًا عند درجة حرارة سطح تبلغ 1200 درجة مئوية و 0 درجة مئوية.

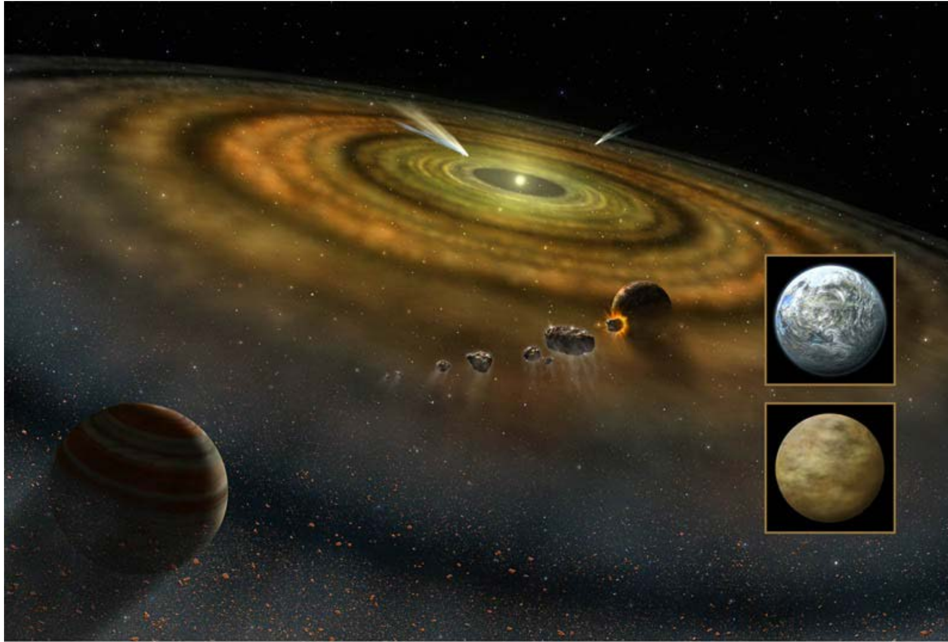
توضح هذه المنحنيات الحسابات التي أجراها كلفن وكينغ في تقديراتهما لعمر الأرض. ينخفض التدرج الحراري الأرضي إلى 40 و 30 و 20 درجة مئوية/كم بعد 7.3 مليون و 13.5 مليون و 30 مليون سنة من التبريد. وضع الأخير مرتين بين قوسين تقدير كلفن وكينغ بـ 24 مليون سنة. وقد أدى اكتشاف النشاط الإشعاعي إلى إبطال هذه النماذج ووفر للجيولوجيين أعماراً أطول لحساب التراكمات الرسوبية (O'Hara, 2018).

عمـر الشمـس

الفرضيـة السـديمية Nebular Hypothesis تنـص علـى أن النظـام الشمسـي الحالـي بالأصـل كان مشـغولاً بسـديم واسـع، وكتلـة بخـار سـاخن بشـدة، أو مـن الممكن سـحب نيزكيـة، تمتـد مـا بعـد مـدار الكوكـب الأقصـى. حـين تبـرد السـديم بالإشـعاع، مثل تلك لـدى كوكب زحـل، لكن بـدون نطـاق أكبر بشـكل واسـعٍ. حافظت الحلقـات علـى الـدوران المتنقـل بفعـل السـديم وجميعهـا يكمـن تقريبـاً في نفـس الكوكـب. انكمـاش غيـر متسـاوٍ في مختلف أجزاء كل حلقـة تـدور سـببت لـه التفكك ويتجمـع بالجـذب المتبـادل في كتلٍ. لـو كانـت هـذه الحلقـات مركبـة مـن كتـل صلبـة صغيـرة نسـبياً، مثـل النيـازك، أو إذا لـو قـد تصلبت بتكثـف الأبخـرة، فـإن الحـرارة المتولـدة بالاصطـدام، مثـل الحلقـة المنكسـرة كانـت مجتمعـة في كتلـة، لكانـت كافيـة بإبـراز درجـة حـراة والتمييـع أو تبخيـر الكتلـة. بـدوران الكتـل السـديمية يفتـرض شـكل شـبه كـروي وتصبـح كواكـب سـيارة. الكتلـة المركزيـة ذات الأصـل السـديمي تشـكل الشـمس، التـي تظـل بحالـة متوهجـة وسـاخنة بشـدة.

شـكل آخـر مـن الفرضيــــة السـديمية يدعـى (الفرضيــــة الكوكبيــــة) Planetesimal Hypothesis والتـي اقترحهـا الجيولوجـي تومـاس شـرودر تشـامبرلين Th. Ch. Chamberlin (تـوفي 1929م). وفـق هـذه الفرضيـة، فـإن بدايـة النظـام الشمسـي هـو سـديم مكانـي، «وأن مـادة هـذا السـديم الحالـي كانـت في حالـة صلبـة أو سـائلة قبـل أن تتجمـع .. تعتبـر عقـد السـديم كنـوى لكواكـب مسـتقبلية والسـدم مـادة مضافـة إلـى هـذه النـوى حتـى تشـكّل الكواكـب. إنهـا تفتـرض أن كلٍ مـن عُقـد وجسـيمات السـديم الغائمـة تحركـت حـول الكتلـة المركزيـة في مـداراتٍ بيضويـة كبيـرة لكـن ليـس مختلفـة المركـز بشـكل مفـرط .. إنهـا تسـتنتج نمـواً بطيئـاً لـلأرض، مـع ارتفـاع بدرجـة الحـرارة الداخليـة تزايـدت الأجـزاء المركزيـة وزحفـت نحـو الخـارج».

من وجهة نظر جيولوجية بحتة فإنّ الاختلاف الأكثر أهمية بين الفرضيتين السديمية والكوكبية هي أنه وطبقاً إلى الأولى، مرت الأرض بمرحلة غازية منصهرة ولهذا لا بد وأن تشكلت القشرة بالتصلب، بينما الثانية تؤدي إلى الاستنتاج بأن الأرض كانت صلبة من بداية تشكلها، وبالنتيجة لم تتشكل أبداً القشرة من التصلب.



تعدّ الفرضية السديمية النموذج الأكثر قبولاً في مجال نشأة الكون لشرح تكوين وتطور النظام الشمسي (بالإضافة إلى أنظمة الكواكب الأخرى). يقترح أن النظام الشمسي يتكون من غاز وغبار يدور حول الشمس. وقد جرى تطوير النظرية من قبل إيمانويل كانط (توفي 1804م) I. Kant ونشرت في كتابه (التاريخ الطبيعي العالمي ونظرية السماء) عام 1755م، ثم جرى تعديلها في عام 1796م من قبل بيير لابلاس. يُعتقد حالياً أن عملية تكوين نظام الكواكب، التي طُبقت في الأصل على النظام الشمسي، تعمل في جميع أنحاء الكون. البديل الحديث المقبول على نطاق واسع للنظرية السديمية هو نموذج القرص السديمي الشمسي (SNDM). (https://en.wikipedia.org/wiki/Nebular_hypothesis)

العمر النظري للشمس. النجوم - إلى حد ما - أقل تعقيدًا بكثير من الكواكب مثل الأرض، لأن الأرض مصنوعة من المواد الصلبة والسوائل والغازات، في حين أن الشمس هي في الأساس مجرد كرة كبيرة من الغاز. هذا يجعل من الممكن لعلماء الفيزياء الفلكية كتابة نماذج رياضية، استنادًا إلى قوانين الفيزياء، التي تكرر كيف تتشكل النجوم مثل الشمس وتتطور، وفي النهاية تواجه مصيرها الطبيعي إما كمستعر أعظم أو قزم أبيض، اعتمادًا على حجمه. النجم. وفقًا لهذه الحسابات، فإن الشمس ليست نجمًا كبيرًا بما يكفي لتنفجر كمستعر أعظم بمجرد احتراقها ؛ بدلاً من ذلك، سوف يتخلص من أجزائه الخارجية ويترك وراءه نجمًا قزمًا أبيض كثيفًا وساخنًا لم يعد ينتج أي حرارة جديدة. بناءً على هذه الحسابات، والتكوين الحالي للشمس ودرجة حرارتها، يتراوح عمر الشمس الآن بين 4.5 و 5.5 مليار سنة. يبدو هذا أقدم قليلاً من عمر النظام الشمسي، لكنه عمر تقريبي يعتمد على الحسابات النظرية، وليس عمرًا مُقاسًا بدقة. يتداخل مع عمر النظام الشمسي البالغ 4.6 مليار سنة المستمدة من القياسات المباشرة لأعمار النيزك.

التكوين الداخلي

القلب الداخلي

منطقة الإشعاع

منطقة الحمل الحراري

تدفقات تحت السطح

طبقة الفوتوسفير

طبقة الكروموسفير

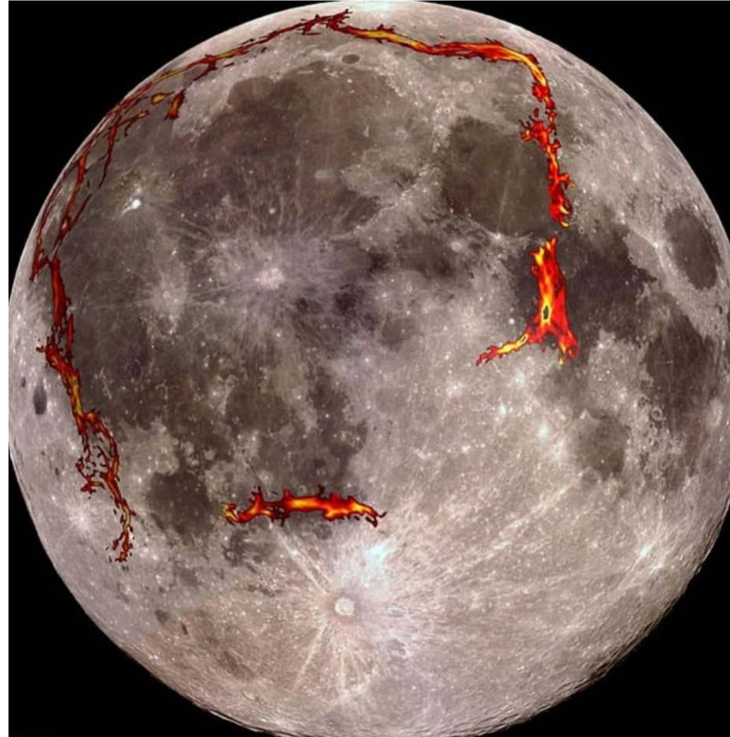
الكورونا

هالة الشمـــس

يوضح الشكل طبقات الشمس

عمـر القمـر

يعد تحديد عمر القمر أمراً بالغ الأهمية لفهم تطور النظام الشمسي وتكوين الكواكب الصخرية، بما في ذلك الأرض. ومع ذلك، على الرغم من أهميته، لم يتم تحديد عمر القمر بدقة. تشكل القمر من حطام تصادم بين الأرض وكوكب أصغر يسمى ثيا Theia، مما أدى إلى إطلاق الصخور المنصهرة التي تجمدت في النهاية إلى جسم كامل بدأ يدور حول الأرض. هذا يعني أن الصخرة التي يتكون منها القمر جاءت من الأرض، ويمكن استخدامها حتى الآن.



تتعرض القشرة الخارجية للقمر للكسور بصورة مستمرة بسبب التفاعلات التكتونية في طبقات سطح القمر؛ مما يؤكد أن طبقات القمر ليست ساكنة و يوجد ما يحركها من الأسفل و هي حمم بركانية تؤدي إلى شق الصخور و الخروج منها.

تشكل النظام الشمسي بأكمله تقريبًا منذ 4.6 مليار سنة، عندما انهار السديم الشمسي. لكن علماء الفلك يعتقدون أن القمر تشكل بعد ذلك، عندما اصطدم كوكب أولي بحجم المريخ بالأرض. تناثر الحطام الناتج عن الاصطدام في مدار حول الأرض ثم تحول إلى القمر، الذي لا يزال يدور حولنا حتى اليوم.

يعتقد علماء الفلك أن هذا الاصطدام حدث منذ حوالي 4.53 مليار سنة، أي بعد حوالي 30-50 مليون سنة من تشكل باقي النظام الشمسي. كان هذا بعد وقت قصير نسبياً من تكوين النظام الشمسي، وقبل وقت طويل من تشكل الحياة على الأرض.

تم العثور على دليل على هذا الاصطدام من قِبل رُوَّاد الفضاء في مهمات هبوط أبولو على سطح القمر. لقد اكتشفوا صخور القمر التي تحتوي على تركيبات نظائر الأكسجين التي تشبه الأرض تقريباً. هذا يعني أن أجزاء من القمر كانت ذات يوم جزءًا من الأرض. أعلن العلماء النتائج التي توصلوا إليها في عام 1969 في مجلة Science، قائلين إن عمر القمر لا يقل عن 4 مليارات سنة. قامت الأبحاث الحديثة بقياس محتوى التنغستن في الصخور العائدة من القمر. Tungsten-182 هو ما تحصل عليه عندما يتحلل الهافنيوم 182. لذلك قام العلماء بقياس نسب التنجستن إلى الهافنيوم لتحديد وقت تشكل القمر بالضبط. هذا هو المكان الذي يبلغ فيه الرقم 4.527 مليار سنة (تزيد أو تقل عن 10 ملايين سنة).

عمـر النيـازك

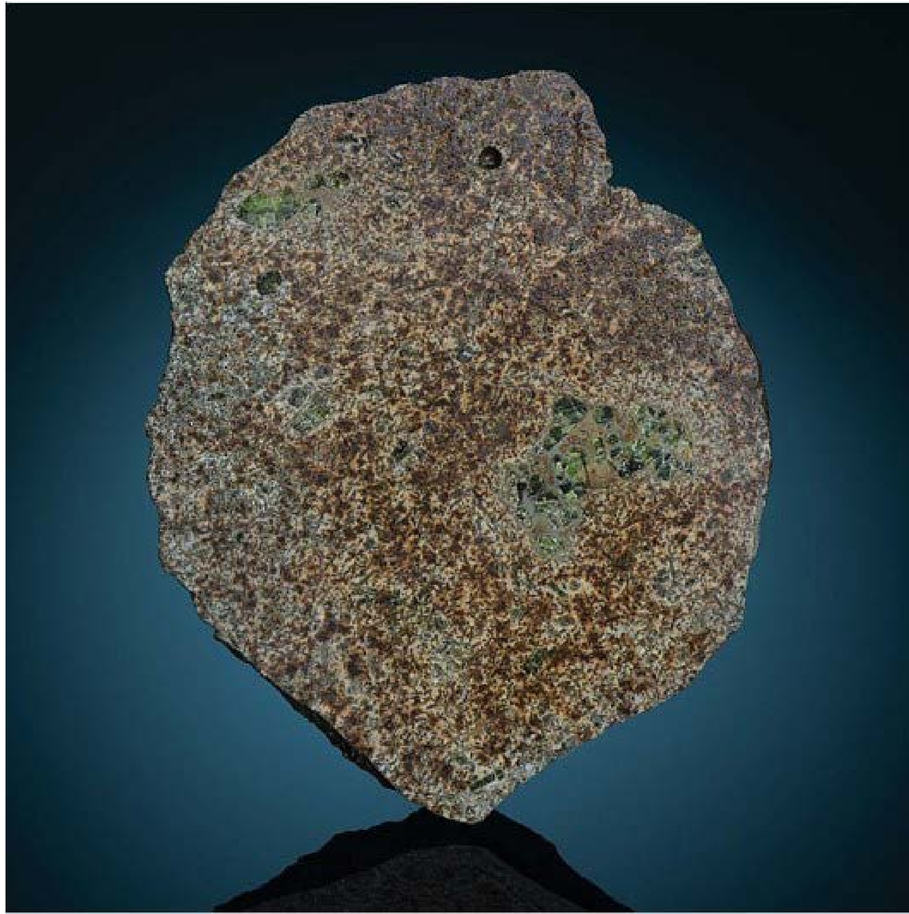
يعرف النيـزك بأنـه قطعـة صلبـة مـن حطـام جسـم فضائـي، كالمذنـب أو كوكـب، وعندمـا تصـل الغـلاف الجـوي نتيجـة الاحتـكاك يتـم تسـخينها وظهـور إشـعاع لتتحـول إلـى كـرة ناريـة يطلـق عليهـا العلمـاء اسـم النيـزك المتفجـر، هـذا وتتـراوح أعمـار النيـازك حسـب منشـئها، فالنيـازك التـي نشـأت مـع الكويكبـات يبلـغ عمرهـا 4,5 مليـار سـنة تقريبًا، والتـي نشـأت مـع المريـخ يتـراوح عمرهـا بـين 200 مليـون إلـى 4,5 مليـار سـنة.

أقـدم النيـازك اعمارهـا تمثـل المرحلـة الأولـى في تكويـن الكواكـب. تتـراوح أعمـار أقـدم النيـازك بـين 4,6 و 4,5 مليـار سـنة. يُعتقـد أن الكويكبـات، وهـذه النيـازك الأقـدم، هـي قطـع مـن الكواكـب الصغيـرة. الكواكـب الصغيـرة هـي أجسـام صلبـة صغيـرة تشـكلت في وقـت مبكـر مـن تاريـخ النظـام الشمسـي، وقـد اجتمـع معظمهـا معًـا ليصبحـوا كواكـب. الكويكبـات هـي بقايـا كواكـب صغيـرة لـم تتكثـف لتصبـح كوكبـاً أكبـر، وبالتالـي لـم تتغيـر كثيـرًا منـذ تلـك المرحلـة المبكـرة مـن تاريـخ النظـام الشمسـي.

يتـم تقديـر أعمـار النيـازك علـى نحـو أكثـر دقـة عـن طريـق جمـع المعلومـات الـواردة مـن تفـكك النظيريـن المشـعين في اليورانيـوم، أي أنـه مـن الممكـن ربـط الوفـرة النسـبية في نظيـري الرصـاص داخـل المـادة النيزكيـة مـع زمـن التشـكل (أعمـار نظائـر الرصـاص).



يُعتقد أن نوعًا واحدًا من النيزك، يُعرف باسم (كوندريت)، يمثل النوع الأول من المواد الصلبة التي تكثف خلال التكوين الأولي للنظام الشمسي، كما أن أعمار الكوندريت تقترب من 4.6 مليار سنة. يبدو أن أنواعًا أخرى من النيازك تمثل مراحل التكوين الكوكبي، مع تناقص الأعمار إلى حوالي 4.55 مليار سنة.



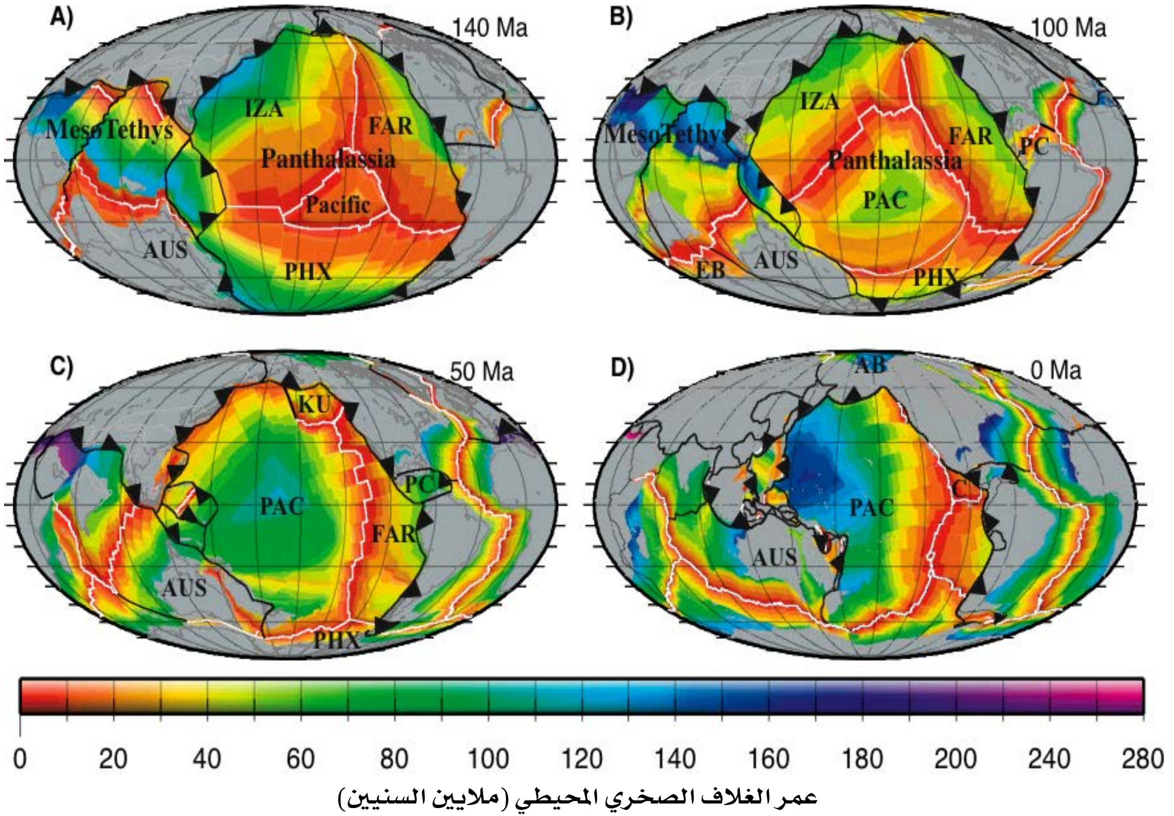
اكتشف فريق من العلماء الفرنسيين واليابانيين نيزك قديم في الصحراء الكبرى الذي تم تحديده الآن على أنه جزء من كوكب أولي تشكل قبل ظهور الأرض، فهو أقدم نيزك يتم العثور عليه على الإطلاق، ويعود تاريخه إلى 4.6 مليار سنة، ويتكون في الغالب من صخور بركانية

عمـــر المحيطـات

عند الحديث عن عمر الأرض، يمكن التعرف على ثلاثة معانٍ مختلفة - تكوين الكوكب بالمعنى الفلكي، وعمر أول قشرة متكونة بعد التبريد من كرة ساخنة (عمر كلفن المحسوب)، وعمر المحيطات. يبدو أن عالم الفلك إدموند هالي E. Halley (توفي 1742) هو أول من اقترح عام 1715م إمكانية تقدير عمر المحيط من ملوحته ومعدل دخول الملح إلى المحيط عن طريق الأنهار.

استخدمت حجة هالي تشبيهاً على أساس البحيرات التي بها أنهار تدخل البحيرة ولكنها لا تخرج منها، مثل البحيرات ذات الصرف الداخلي، على سبيل المثال بحر قزوين والبحر الميت. يجب أن تزداد ملوحة هذه البحيرات بمرور الوقت بسبب المدخلات من الملح المذاب للأنهار وكذلك بسبب تبخر المياه. إذا جرى أخذ عينات من مياه البحيرة على بُعد عدة مئات من السنين، فيجب ملاحظة زيادة الملوحة وتقديرات «قاعدة التناسب»، وإجمالي الوقت المطلوب «للحصول على درجة الملوحة الحالية».

صرح هالي أنه يمكن حساب عمر المحيطات بالمثل: «كان من المفترض أن يكون الإغريق واللاتين القُدامى قد أفادونا بدرجة ملوحة البحر كما كانت قبل 2000 عام». أدرك هالي أن اقتراحه كان مجرد افتراض، وحثّ على جمع البيانات ذات الصلة عن المحيطات وملوحة البحيرة. كما أدرك أيضاً أنه إذا كانت المحيطات مالحة في البداية، فإن تقدير العمر سيكون قيمة قصوى وأن هذا «من شأنه أن يدحض الفكرة القديمة التي اعتبرها البعض مؤخراً، وهي أبدية كل الأشياء». واختتم بحثه في عام 1715 بما يأتي: «قد يكون العالم أقدم بكثير مما كان يتخيله الكثيرون حتى الوقت الحالي» (O'Hara, 2018).



العمر وقياس الأعماق لقشرة المحيطات في العالم خلال الـ 140 مليون سنة الماضية

لكن طريقة هالي يكتنفها الكثير من الخلط وعدم الدقة إذا أردنا تقييمها حالياً، فمثلاً، نحن لا نعلم إن كان معدل الملح يبقى ثابتاً لفترة طويلة من الزمن، ناهيك عن أنّه لم يقدم أي دليلٍ علمي ملموس يقودنا إلى تقدير معقولٍ لعمر الأرض، وقد ميز هالـــي بين عمر الأرض وزمن ظهور الإنسان على الأرض (رونن، 1990م).

يبدو أن اقتراح هالي قد جرى نسيانه حتى عام 1876م، عندما استخدم توماس ميلرد ريد T.M. Reade (توفي 1909م) تركيزات الكلوريد والكبريتات من الكالسيوم والمغنيسيوم في المحيطات ومدخلات هذه المركبات من الأنهار. وصف طريقته بأنها «تعرية كيميائية». تراوحت نتائجه من 25 إلى 200 مليون سنة. نظراً لأن الحجر الجيري والدولوميت والكبريتات تترسب من المحيطات (وبالتالي إعادة ضبط ساعة الملوحة)، لم يعتقد البعض أن هذه التقديرات صحيحة، بما في ذلك الجيولوجي الأيرلندي جون جولي J. Joly (توفي 1933م).

وقد أظهر جولي في كتابه (النشاط الإشعاعي والجيولوجيا) (1909م) أنه كان من رُوَّاد كل من الجيولوجيا وظاهرة النشاط الإشعاعي المكتشفة مؤخراً. اشتهر بتقدير عمره للمحيطات بناءً على محتواها من الصوديوم، الذي نُشر عام 1899م.

كانت طريقة جولي مشابهة لطريقة ريد، لكنه ركز بدلاً من ذلك على تقدير الكمية الإجمالية لعنصر الصوديوم في المحيطات مقسومة على كمية الصوديوم في المحلول التي تساهم سنوياً في المحيطات بواسطة أنهار العالم، باستخدام هذه الصيغة:

عمر المحيطات = إجمالي الصوديوم في المحيطات (بالأطنان) / تدفق الصوديوم من الأنهار (أطنان/ سنة)

لقد حدد العمر التقديري للمحيطات من 80 مليون إلى 90 مليون سنة، لكنه سمح بحد أقصى للعمر بهذه الطريقة 150 مليون سنة في ورقته اللاحقة عام 1923. وبحلول هذا الوقت كان يدرك أن الأعمار الكيميائية (Pb / U) تنتج

أعماراً متشابهة وأكبر. تماشياً مع عقيدة الوتيرة الواحدة، افترض جولي معدل انحلال كيميائي موحد من الأنهار من سطح الأرض، وافترض أيضاً مساحة أرض ثابتة وهطول الأمطار «ضمن حدود واسعة»، ولكن بمتوسط ثابت طويل الأجل على مدار الزمن الجيولوجي. اختار عنصر الصوديوم باعتباره المتتبع الوحيد بسبب قابلية ذوبانه العالية على عكس الكبريتات وكربونات العناصر، مثل الكالسيوم والمغنيسيوم، والتي ترسبت من المحلول كترسبات رسوبية بحرية.

لإدخال القيم في المعادلة البسيطة أعلاه، كانت هناك حاجة إلى قدر كبير من المعلومات، واعتمد جولي بشكل كبير على التقارير الواردة من بعثة HMS Challenger Oceanic (1872-1878)، التي قدمت الملوحة والكيمياء لعينات المياه التي جرى جمعها. قدم السير جون موراي S. J. Murray (توفي 1914م)، الذي أبحر على متن السفينة تشالنجر ونظم لاحقاً نشر النتائج، معلومات عن أنهار العالم. تضمنت الكميات اللازمة لإكمال المعادلة حجم وكتلة المحيط، وملوحته، والكتلة الكلية للصوديوم في المحيط، وكتلة الصوديوم التي تساهم بها أنهار العالم، وكذلك التصريف السنوي للنهر. نتج عن النتائج الأولية عمر 90 مليون سنة للأرض باستخدام الأرقام التالية:

$$\frac{14,151\times10^{12}}{15,727\times10^{4}} = 90 \times 10^{6} \text{ سنة}$$

جرت مناقشة عدد كبير من المتغيرات التي يمكن أن تقدم أخطاء إيجابية وسلبية في هذا التقدير بإسهاب من قِبل جولي، بما في ذلك تقدير تخميني جداً للملوحة الأولية للمحيطات، وكمية الصوديوم المتضمنة في تبخّر مياه المحيطات، وتآكل السواحل. المساهمة، وتغيير الجغرافيا القديمة، وأنواع الصخور المختلفة المكشوفة، والمتبخرات الملحية المترسبة، والعديد من المتغيرات الأخرى. كان تقييم هذه المتغيرات مقيداً بشكل سيئ، لكن تقدير جولي النهائي لم يختلف اختلافاً جوهرياً عن ذلك أعلاه. اليوم، يدرك علماء المحيطات أن جولي كانت في الواقع تحسب وقت إقامة الصوديوم في المحيطات، التي تقدر بنحو 68 مليون سنة (O'Hara, 2018).

عمـــر الأرض

منذ حوالي 4.6 مليار سنة، كان النظام الشمسي عبارة عن سحابة من الغبار والغاز تعرف باسم «السديم الشمسي»، حيث أدت الجاذبية إلى انهيار المادة على نفسها عندما بدأت في الدوران، وكونت بذلك الشمس في مركز هذا السديم، ثم بعد ذلك بدأت المواد المتبقية في التكتل، بحيث تتجمع الجسيمات الصغيرة معاً مرتبطة بقوة الجاذبية لتكوين جزيئات أكبر، كما وجرفت الرياح الشمسية العناصر الخفيفة، مثل: الهيدروجين والهيليوم من السديم الشمسي، ولكنها تركت فقط المواد الصخرية الثقيلة لتكوين عوالم أرضية صغيرة مثل كوكب الأرض، أما العناصر الخفيفة تجمعت معاً مكونة الكواكب الغازية العملاقة، وبنفس هذه الطريقة تكونت الكويكبات والمذنبات والكواكب والأقمار.

تم العثور على الصخور القديمة التي يزيد عمرها على 3.5 مليار سنة في جميع قارات الأرض. أقدم صخور على الأرض تم العثور عليها حتى الآن هي Acasta Gneisses في شمال غرب كندا (Ga 4.03) وصخور Isua Supracrustal في غرب جرينلاند (3.7 إلى Ga 3.8)، ولكن توجد أيضًا صخور مدروسة جيدًا تقارب أقدمها في وادي نهر مينيسوتا وشمال ميشيغان (3.5–3.7 مليار سنة)، في سوازيلاند (3.4–3.5 مليار سنة)، وغرب أستراليا (3.4–3.6 مليار سنة).

تم تحديد عمر هذه الصخور القديمة بعدد من طرق التأريخ الإشعاعي واتساق النتائج يمنح العلماء الثقة في أن الأعمار صحيحة في حدود نسبة قليلة. هذه الصخور القديمة ليست من أي نوع من «القشرة البدائية» ولكنها تدفقات الحمم البركانية والرواسب المترسبة في المياه الضحلة، وهو مؤشر على أن تاريخ

الأرض بدأ قبل فترة طويلة من ترسب هذه الصخور. في غرب أستراليا، تبلغ أعمار بلورات الزركون المفردة الموجودة في الصخور الرسوبية الأصغر سناً 4.3 مليار سنة، مما يجعل هذه البلَّورات الصغيرة أقدم المواد الموجودة على الأرض حتى الآن. تظهر الأعمار التي تم قياسها لأقدم صخور الأرض وأقدم بلَّوراتها أن عمر الأرض لا يقل عن 4.3 مليار سنة ولكنها لا تكشف عن العمر الدقيق لتكوين الأرض.

يُذكر أنّ أفضل تقدير لعمر الأرض اعتمد على التأريخ الإشعاعي لحطام نيزك كانيون ديابلو (Canyon Diablo)، فعندما درس العلماء شظاياه حدّدوا نسب العناصر مثل اليورانيوم المشع ونواتج تحلله خلال مليارات السنين القمر كوكب أكثر بدائية من الأرض لأنه لم يتأثر بتكتونية الصفائح ؛ وبالتالي، فإن بعض صخورها القديمة أكثر وفرة. تم إرجاع عدد صغير فقط من الصخور إلى الأرض بواسطة ست بعثات أبولو وثلاث بعثات لونا.

تختلف هذه الصخور اختلافاً كبيراً في العمر، وهو انعكاس لأعمارها المختلفة من التكوين وتاريخها اللاحق. ومع ذلك، فإن أقدم صخور القمر القديمة يتراوح عمرها بين 4.4 و 4.5 مليار سنة وتوفر الحد الأدنى من العمر لتشكيل أقرب كوكب لنا. تم العثور على آلاف النيازك، وهي أجزاء من كويكبات سقطت على الأرض. توفر هذه الأجسام البدائية أفضل الأعمار لوقت تكوين النظام الشمسي. يوجد أكثر من 70 نيزكاً، من أنواع مختلفة، تم قياس أعمارهم باستخدام تقنيات التأريخ الإشعاعي.

تظهر النتائج أن النيازك، وبالتالي النظام الشمسي، تشكلت قبل 4.53 و4.58 مليار سنة. لا يأتي أفضل عمر للأرض من تأريخ الصخور الفردية ولكن من خلال اعتبار الأرض والنيازك جزءًا من نفس النظام المتطور الذي فيه التركيب النظائري للرصاص، وتحديداً نسبة الرصاص 207 إلى الرصاص 206 يتغير بمرور الوقت بسبب اضمحلال اليورانيوم المشع 235 واليورانيوم 238 على التوالي.

استخدم العلماء هذا النهج لتحديد الوقت المطلوب للنظائر الموجودة في أقدم خامات الرصاص على الأرض، التي لا يوجد منها سوى عدد قليل، لتتطور من تكوينها البدائي، كما تم قياسه في مراحل خالية من اليورانيوم من نيازك الحديد، إلى تركيباتها في الوقت الذي تنفصل فيه خامات الرصاص عن خزانات الوشاح. تؤدي هذه الحسابات إلى عمر للأرض والنيازك، وبالتالي النظام الشمسي، يبلغ 4.54 مليار سنة مع عدم يقين أقل من 1 في المائة. على وجه الدقة، يمثل هذا العمر آخر مرة كانت فيها نظائر الرصاص متجانسة عبر النظام الشمسي الداخلي والوقت الذي تم فيه دمج الرصاص واليورانيوم في الأجسام الصلبة للنظام الشمسي. يتوافق عمر 4.54 مليار سنة الموجود في النظام الشمسي والأرض مع الحسابات الحالية من 11 إلى 13 مليار سنة لعمر مجرة درب التبانة (بناءً على مرحلة تطور النجوم العنقودية الكروية) والعمر من 10 إلى 15 مليار سنة لعمر الكون (بناءً على ركود المجرات البعيدة).

في الواقع تشكل اللب الصخري للأرض أولاً، ومع اصطدام العناصر الثقيلة وترابطها معاً، نزلت هذه المادة الكثيفة إلى المركز، بينما شكلت المواد الخفيفة القشرة الأرضية الخارجية، ومن المحتمل أن يكون المجال المغناطيسي للكوكب

قد تشكل في هذا الوقت أيضاً، أما جاذبية الأرض سحب بعض الغازات من الفضاء التي كانت تشكل الغلاف الجوي للكوكب.

يبلغ عمر أقدم الصخور الموجودة على الأرض حتى الآن 4.0 مليار سنة. لا نتوقع العثور على أي صخور من بداية تاريخ الأرض؛ لأنه يبدو أن الأرض مرت بمرحلة منصهرة إلى حد كبير بعد فترة وجيزة من تشكلها. بالإضافة إلى ذلك، فإن الأرض كوكب ديناميكي يعمل على تآكل ودفن وتحولات صخورها بطرق موصوفة في دورة الصخور. قليل من الصخور، إن وجدت، من القشرة الصلبة الأصلية للأرض من المتوقع أن تظل موجودة.

أقدم المعادن على وجه الأرض: توجد بعض الحبيبات المعدنية في الحجر الرملي القديم من قارة أستراليا التي تعود أعمارها الإشعاعي إلى 4.3 مليار سنة. يشير هذا إلى أنه عندما ترسبت الرمال (والتي ربما كانت قبل حوالي 3.5 مليار سنة بواسطة قياسات عمرية أخرى)، كان عمر بعض الصخور في الجبال التي تعرضت للتعرية في الرمال 4.3 مليار سنة.

عُمر قشرة الأرض ووشاحها معًا نظريًا. يمكن اعتبار قشرة الأرض وقشرة الأرض «صخورًا ضخمة»، تختلف عن اللب المنصهر جزئياً، والذي يتكون في الغالب من الحديد. إن جمع النسب النظيرية لليورانيوم والرصاص من قشرة الأرض ووشاحها ككل يعطي النسب النظيرية التي تتقارب في عمر يتراوح بين 4.5 و 4.6 مليار سنة مضت. يعتمد هذا العمر على بعض الافتراضات حول كيفية تشكل القشرة من صخور الوشاح الذائبة وتطورت بشكل منفصل عن الوشاح على مدار تاريخ الأرض، لذلك فهو قياس غير مباشر للعمر وليس قياسًا

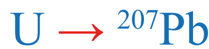
مباشـرًا مثل عمـر صخـرة واحـدة أو معـدن.. الـدليـل علـى أن الأرض تشـكلت كجـزء مـن النظـام الشمسـي. تُظهـر نسـب النظـائـر والعناصـر الكيميائيـة لجميـع مكونـات النظـام الشمسـي التـي تمكنـا مـن قياسـها - الشـمس، والعـديـد مـن الكـواكـب، وقمـر الأرض، والكـويكبـات، والمذنبـات - نفـس الخصـائـص، ونفـس «بصمـات الأصـابـع»، ممـا يشـير إلـى أنهـم جميعًـا تتكـون مـن نفـس مجموعـة العنـاصـر الكيميـائيـة. تختلـف هـذه المجموعـة مـن العنـاصـر الكيميـائيـة عـن نسـب النظـائـر والعنـاصـر الكيميـائيـة التـي تتكـون منهـا أنظمـة النجـوم الأخـرى، ممـا يـدل علـى أن هـذه المكونـات مـن النظـام الشمسـي تشـترك في أصـل مشـترك.

عصـــــر النظائـــــر

تستخدم عادةً نسب يورانيوم/ رصاص البسيطة (Pb / U) لحساب أعمار المعادن التي يشار إليها باسم الأعمار الكيميائية Chemical Ages وهي تختلف اختلافاً واضحاً عن الأعمار النظيرية. النظائر هي ذرات من العنصر نفسه، ولكن مع عدد مختلف من النيوترونات في النواة وسلوكها الكيميائي هو نفسه ولكن خصائصها الفيزيائية تختلف.

كان هناك شك في وجودها من قبل فريدريك سودي F. Soddy (توفي 1956م)، أحد المشاركين في اكتشاف قانون الاضمحلال الإشعاعي، عندما لوحظ أن الأوزان الذرية للعناصر لم تكن أعداداً صحيحة كاملة، مما يشير إلى أن العناصر الطبيعية كانت مزيجاً من نظائر من العنصر نفسه. في العقود الأولى من القرن العشرين، أثبت الفيزيائيون أن هناك أربعة نظائر للرصاص، ثلاثة منها يجري إنتاجها بوساطة ثلاثة مخططات منفصلة لتحلل الأبوين والابنة:


$Th \rightarrow {}^{208}Pb$


$U \rightarrow {}^{207}Pb$


${}^{238}U \rightarrow {}^{206}Pb$

تشير الأرقام المرتفعة هنا إلى الأوزان الذرية بحيث يكون الاختلاف الوحيد بين ^{207}Pb و ^{206}Pb هو نيوترون إضافي واحد في النواة. نظير الرصاص الرابع هو ^{204}Pb، الذي لا يحوي على أصل مشع ويمثل (الرصاص الأولي) الموجود في الوقت الذي تشكلت فيه قشرة الأرض.

ومع ذلك، هناك سبب وجيه للاعتقاد بأن هذا الرصاص الأولي ليس ^{204}Pb فقط، لكنه يشتمل أيضًا على كميات غير معروفة من ^{207}Pb و ^{206}Pb و ^{208}Pb. يجب أن تكون أي محاولة لتحديد تاريخ عمر الأرض قادرة على التمييز بين الرصاص الأولي والمولد المشع، وقد تبين أن هذه مهمة صعبة، لكن تكمن الإجابة في النيازك.

قبل أن يجري قياس وفرة نظائر الرصاص، كان مطياف الكتلة في ثلاثينيات القرن الماضي، والذي كان يقيس وفرة النظائر الأخف بأية دقة، بحاجة إلى تحسين. قام الفيزيائي ألفريد نير A. Nier (توفي 1994م)، الذي عمل كزميل ما بعد الدكتوراه في جامعة هارفارد في عام 1937م ولاحقاً في جامعة مينيسوتا، بإجراء تحسينات كبيرة على مقياس الطيف الكتلي وسمح بأول قياسات دقيقة لنظائر الرصاص في المعادن، بخاصة الجالينا (PbS) أو كبريتيد الرصاص.

لا يحوي هذا المعدن على الرصاص المشع؛ لأنه يحوي على القليل من اليورانيوم أو الثوريوم أو أنه يحوي على القليل من اليورانيوم أو الثوريوم. قام نير وزملاؤه بعد ذلك بقياس نظائر الرصاص المشعة في مجموعة متنوعة من المعادن من مختلف الأعمار، وخاصة البتشبلند (UO_2) من جميع أنحاء العالم، في عام 1939. احتوت هذه المعادن على نوعين من الرصاص: الرصاص البدائي والرصاص المشع بسبب تحلل اليورانيوم والثوريوم في المعدن. أدت هذه القياسات لاحقاً إلى قيام عدد من العلماء باقتراح نموذج عام بشكل مستقل لتطور نظائر الرصاص في الأرض وأول عصور نظائر U-Pb للأرض، هؤلاء العلماء هم: جيرلنغ Gerling (1942)، وهولمز Holmes (1946 - 1947)، وهوترمانز Houtermans (1946 - 1947)،

وجميعهم استخدموا بيانات نير ووصلوا إلى تقديرات مماثلة لعمر الأرض: ونحو ± 3 بلايين سنة، وتسمى طريقتهم نموذج هولمز-هوترمانز، مع أن جيرلينغ له الأسبقية بوضوح إلا أنه لم يكن هوترمانز على علم بورقة هولمز حتى ذهبت ورقته للطباعة (O'Hara, 2018).

من المعروف حالياً أن النظائر المستقرة النهائية في سلسلة اليورانيوم والثوريوم هي ^{207}Pb و ^{206}Pb و ^{208}Pb. الأزمنة المشار إليها هي فترات نصف عمر. كانت هذه هي حالة المعرفة في بداية القرن العشرين (O'Hara, 2018).

قام نهج جيرلينغ - هولمز - هوترمانز، استناداً إلى بيانات نظائر نير، بالافتراضات التالية :

- كان للأرض في البداية تركيبة نظيرية موحدة من الرصاص حتى وقت تشكل القشرة.
- بعد تشكل القشرة، اختلفت نسبة Pb / U قليلاً من مكان إلى آخر.
- جرى تجميد نسب Pb / U في أماكن مختلفة ولم تتغير إلا بسبب الاضمحلال الإشعاعي.
- لم يختلط الرصاص في كل معدن مع الرصاص من أماكن أخرى.

يصحح النموذج نظائر الرصاص للمعادن المشعة عن طريق طرح تركيبة الرصاص الأولية باستخدام عينات نير التي أظهرت الرصاص الأقل إشعاعياً. بالإضافة إلى ذلك، يفترض النموذج أن هذه الخيوط الأقل إشعاعاً تمثل الرصاص الأولي للأرض. في توليفة أحدث بعنوان الرصاصيات التكتونية

تتضمن مئات من تحليلات نظائر الرصاص من مجموعة متنوعة من البيئات الجيولوجية، أظهر المؤلفون أن معظم نظائر الرصاص يمكن أن تكون جيدة إلى حد ما بناءً على الخزانات الثلاثة المتميزة مع Pb مختلفة / نسب U- القشرة القارية السفلية والقشرة القارية العليا ووشاح الأرض.

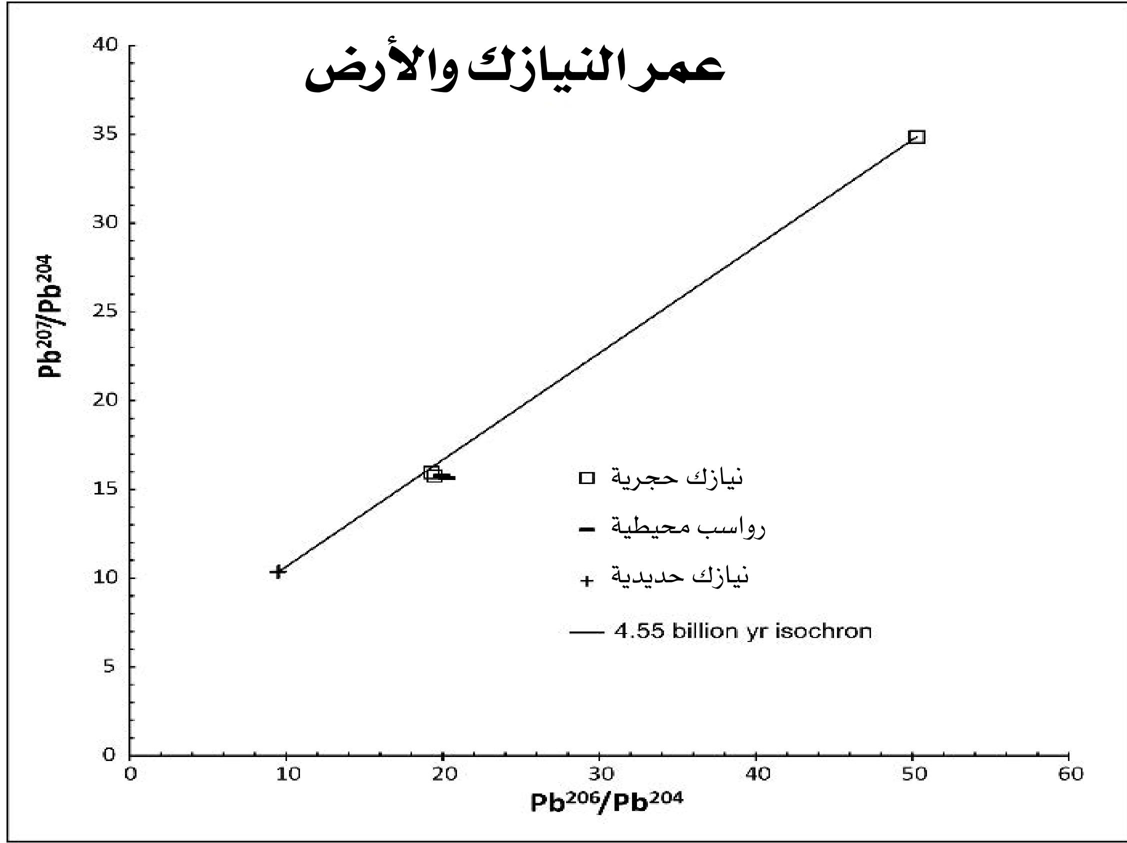
من الممكن حساب ثلاثة أعمار نظيرية مستقلة من مخططات الانحلال الثلاثة المذكورة أعلاه، وقد استخدم آرثر هولمز اثنين من مخططات الانحلال هذه، وهما نسبة مخطط انحلال الرصاص 207 ومخطط الرصاص 206. ميزة أخذ هذه النسبة هي أن المعلومات عن وفرة نظائر اليورانيوم ليست مطلوبة. تراوحت نتائجه المتعلقة بعمر الأرض بين 2.7 و 3.3 بليون سنة، مع اختلاف مجموعات العينات التي أعطت أعماراً مختلفة (O'Hara, 2018).

كان من الواضح أن العديد من عينات نير أنه لم تفِ بالافتراضات الصارمة المطلوبة، وهي أن نسبة Pb / U تبقى ثابتة خلال الزمن الجيولوجي. من المرجح أن يغير النشاط الناري الذي ينطوي على ذوبان الصخور هذه النسبة بمرور الوقت، ولهذا السبب ربما كان تقدير هولمز أصغر من اللازم بنحو بليون سنة. بالإضافة إلى ذلك، من المحتمل أن عينات نير الأقل إشعاعًا لم تمثل التكوين البدائي أو الأولي لرصاص الأرض. الحسابات التي تم إجراؤها بشكل مستقل بوساطة سيرلينغ Cerling وهوترمانز Houtermans، مع أنها ليست واسعة النطاق مثل تلك التي قام بها هولمز، أعطت نتائج مماثلة.

المحاولة المهمة التالية لتقدير عمر الأرض كانت من قِبل الباحثة كلير باترسون C. Paterson (توفيت 1995م) وزملائها لعمل نُشر في عامي 1955 و 1956،

وقد وضعوا افتراضين جريئين: أولاً، أن التركيب النظائري للرصاص للنيازك الحديدية يمثل التكوين البدائي أو الأولي للرصاص من الأرض. واقترحوا كذلك أن التركيبة النظيرية للرصاص في رواسب قاع المحيط الحديثة كانت مخاليط متوسطة للأرض ككل.

قاموا بتحديد عمر خمسة نيازك (ثلاثة نيازك حجرية ونيزكين حديديين) لإعطاء عمر 4.55 بليون سنة باستخدام طريقة Pb-Pb Isochron. ثم أظهروا أن رواسب المحيطات الحديثة تكمن أيضاً على النيزك نفسه أيزوكرون Isochron، مما يعني أن النيازك والأرض كانت جزءاً من النظام نفسه نظائر الرصاص ولها العمر نفسه: 4.55 بليون سنة. هذا هو عمر الأرض المقبول حالياً (O'Hara, 2018).



أيزوكرون Isochron (خط على الرسم التخطيطي يربط بين النقاط المتعلقة بالزمن نفسه أو الأزمنة المتساوية) رصاص - رصاص للنيازك ورواسب المحيطات الحديثة. يشير منحدر الأيزوكرون إلى عمر 4.55 بليون سنة، وهو العمر المقبول حالياً للأرض.

إن سبب اعتماد باترسون وزملائها على النيازك هو الحصول على عينةٍ من الصخور لم تكن تأثرت بأيٍّ من العوامل الأرضية، وهذه العينة غير موجودة من الناحية العملية في الأرض أبداً، لذلك توجهت أنظاره إلى الصخور السماوية،



وتحديداً النيازك. فهي قطع صخرية تجوب السماء منذ بداية نشأة المجموعة الشمسية ولم تتعرض لأي عوامل حت أو تعرية أو غيرها يمكن أن تؤثر على بنيتها أو شكلها. ومن هنا قاس العلماء تفكك البوتاسيوم-الأرغون (Potassium-Argon) والثوريوم - الرصاص (Thorium-Plomb) واليورانيوم-الرصاص (Uranium-Plomb) والروبيديوم-السترونتيوم (Rrubidium-Strontium)، وبذلك حصلوا على الرقم (4.54 ± 0.05 بليون سنة) كأقرب رقم حقيقي لعمر الأرض (Dalrymple, 2001). لا شك بأن هذا الرقم قد يتغير مع تطوّر أدوات ووسائل القياس في المستقبل.

قيــاس الإشـــعاع

تنقسم العناصر في الكون إلى عناصر مشعة، وعناصر غير مشعة (مستقرة)، هذه العناصر المشعة تتحل طبيعيًا نتيجة الإشعاع الناتج منها إلى عناصر أقل في العدد الكتلي، وتتميز العناصر المشعة بأن لكل عنصر دورة إشعاعية مختلفة عن العناصر الأخرى، وله خاصية مميزة هي فترة عمر النصف؛ أي الفترة التي عندها يكون المتبقي فقط هو نصف كمية العنصر المشع الأولى، استطاع العلماء الاستفادة من هذه الخواص مجتمعة في استخدامها في قياس أعمار بقايا الكائنات الحية التي ماتت من آلاف السنين، والصخور، والحفريات

فتح اكتشاف الانحلال الإشعاعي الطبيعي لليورانيوم في عام 1896 بواسطة هنري بيكريل، الفيزيائي الفرنسي، آفاقًا جديدة في العلم. في عام 1905، قدم الفيزيائي البريطاني اللورد رذرفورد - بعد تحديد بنية الذرة - أول اقتراح واضح لاستخدام النشاط الإشعاعي كأداة لقياس الوقت الجيولوجي مباشرة؛ بعد ذلك بوقت قصير، في عام 1907، نشر البروفيسور ب. بولتوود، عالم الكيمياء الإشعاعية في جامعة ييل، قائمة بالأعمار الجيولوجية بناءً على النشاط الإشعاعي. على الرغم من مراجعة أعمار بولتوود منذ ذلك الحين، إلا أنها أظهرت بشكل صحيح أن مدة الوقت الجيولوجي ستُقاس بمئات الآلاف من الملايين من السنين.

كانت السنوات الأربعون التالية فترة من التوسع في البحث حول طبيعة وسلوك الذرات، مما أدى إلى تطوير الانشطار النووي والاندماج كمصادر للطاقة. كان أحد النتائج الثانوية لهذا البحث الذري هو التطوير والتحسين المستمر للطرق والتقنيات المختلفة المستخدمة لقياس عمر مواد الأرض. تم إنجاز المواعدة الدقيقة منذ عام 1950.

يتكون العنصر الكيميائي من ذرات تحتوي على عدد محدد من البروتونات في نواتها لكن تختلف الأوزان الذرية بسبب الاختلافات في عدد النيوترونات. تسمى ذرات نفس العنصر ذات الأوزان الذرية المختلفة بالنظائر. التحلل الإشعاعي هو عملية عفوية يفقد فيها النظير (الأم) جزيئات من نواته لتكوين نظير لعنصر جديد (الابنة). يتم التعبير عن معدل الانحلال بشكل ملائم من حيث عمر النصف للنظير، أو الوقت الذي يستغرقه نصف نظير مشع معين في العينة حتى يتحلل. تمتلك معظم النظائر المشعة معدلات تحلل سريعة (أي فترات نصف عمر قصيرة) وتفقد نشاطها الإشعاعي في غُضون أيام أو سنوات قليلة. ومع ذلك، فإن بعض النظائر تتحلل ببطء، ويستخدم العديد منها كساعات جيولوجية.

إن تأريخ الصخور بواسطة أجهزة ضبط الوقت المشعة أمر بسيط من الناحية النظرية، لكن الإجراءات المعملية معقدة. يتم تحديد عدد النظائر الأم والابنة في كل عينة من خلال أنواع مختلفة من الأساليب التحليلية. تكمن الصعوبة الرئيسية في قياس كميات صغيرة جدًا من النظائر بدقة.

يمكن استخدام طريقة البوتاسيوم والأرجون على الصخور التي لا يتجاوز عمرها بضعة آلاف من السنين وكذلك على أقدم الصخور المعروفة. يوجد البوتاسيوم في معظم المعادن المكونة للصخور، ونصف عمر نظيره المشع البوتاسيوم 40- هو بحيث تتراكم كميات قابلة للقياس من الأرجون (ابنة) في المعادن الحاملة للبوتاسيوم من جميع الأعمار تقريبًا، وكميات البوتاسيوم والأرجون يمكن قياس النظائر بدقة، حتى بكميات صغيرة جدًا. حيثما كان ذلك ممكنًا، يتم استخدام طريقتين أو أكثر من طرق التحليل على نفس عينة الصخور لتأكيد النتائج.

تعتمد الساعة الذرية المهمة الأخرى المستخدمة لأغراض التأريخ على الانحلال الإشعاعي لنظير الكربون 14، الذي يبلغ نصف عمره 5730 سنة. يتم إنتاج الكربون 14 بشكل مستمر في الغلاف الجوي العلوي للأرض نتيجة لقصف النيتروجين بالنيوترونات من الأشعة الكونية. يختلط هذا الكربون المشع حديثًا بشكل موحد مع الكربون غير المشع الموجود في ثاني أكسيد الكربون في الهواء، وفي النهاية يجد طريقه إلى جميع النباتات والحيوانات الحية. في الواقع، يحتوي كل الكربون الموجود في الكائنات الحية على نسبة ثابتة من الكربون المشع إلى الكربون غير المشع. بعد موت الكائن الحي، تنخفض كمية الكربون المشع تدريجياً حيث يعود إلى النيتروجين 14 عن طريق الاضمحلال الإشعاعي. من خلال قياس كمية النشاط الإشعاعي المتبقية في المواد العضوية، يمكن حساب كمية الكربون 14 في المواد ويمكن تحديد وقت الوفاة. على سبيل المثال، إذا وجد أن الكربون من عينة من الخشب يحتوي فقط على نصف كمية الكربون 14 الموجودة في نبات حي، فإن العمر التقديري للخشب القديم سيكون 5730 عامًا.

لقد أصبحت ساعة الكربون المشع أداة مفيدة للغاية وفعالة في تحديد تاريخ الحلقات المهمة في عصور ما قبل التاريخ الحديثة للإنسان، ولكن نظرًا لعمر النصف القصير نسبيًا للكربون 14، يمكن استخدام الساعة لتأريخ الأحداث التي إتخذت مكان فقط خلال 50000 سنة الماضية.

التـأريخ الإشـعاعي Radiometric Dating

التأريخ الإشـعاعي هـو تقنيـة تُسـتخدم لتأريخ المواد بنـاءً على معرفـة معـدلات الانحـلال للنظائـر التـي تحـدث بشـكل طبيعـي والوفـرة الحاليـة. إنـه مصدرنـا الرئيسـي للمعلومـات حـول عمـر الأرض ومصـدر مهـم للمعلومـات حـول معـدلات التغير التطـوري. تتكون كل المواد العادية من مجموعـات من العناصـر الكيميائيـة، لكل منها رقمها الـذري، مما يشير إلـى عدد البروتونـات في نـواة الـذرة. بالإضافة إلـى ذلك، قد توجد العناصـر في نظائـر مختلفة، حيث يختلف كل نظيـر للعنصر فقط في عـدد النيوترونـات في النـواة. يسـمى نظيـر معـين لعنصـر معـين نوكليـد. بعض النويدات بطبيعتها غير مستقرة. أي، في نقطـة زمنيـة عشـوائية ما، سـيتم تحويل ذرة من هـذا النويدات إلـى نوكليـدة مختلفـة من خـلال العمليـة المعروفة باسـم التحلل الإشـعاعي. يتـم تحقيـق هـذا التحـول عن طريق انبعـاث جسـيمات مثل الإلكترونـات (المعروفة باسـم اضمحـلال بيتا) أو جسـيمات ألفا. بعد انقضاء فترة عمـر النصـف؛ فـإن النـواة الأصليـة تتحلل إلـى (نويـدات – Nuclides) تُسـمى «ابنـة»، بالإضافـة إلـى النـواتج الأخـرى مـن عمليـة التحلـل. في معظـم الحـالات فـإن هـذه النويـدة «الابنـة» تكون مشـعة أيضـا؛ ذلـك يـؤدي إلـى تكـوُّن دورة نشـاط إشـعاعي جديـدة، هـذه الـدورة تنتهـي مع تكون نويـدة. وتتميـز كل خطـوة في هـذه السلسـلة بـأن لهـا فتـرة عمـر نصـف مميـز. فمـاذا إذا كانـت دورة عنصـر ما تتكـون مـن أكثـر مـن فتـرة عمـر نصـف؟ في هـذا الحالـة يتـم اعتمـاد أطـول فتـرة عمـر نصـف علـى أنهـا هـى الـدورة الرئيسـية، أمـا إذا كان للعنصـر فتـرات عمـر نصـف متقاربـة؛ في هـذه الحالـة سـوف يكـون لـدي العلمـاء معلومـات واضحـة عـن هـذه الفتـرات وهـل صالحـة للدراسـة أم لا.

الدقة في تحديد التأريخ الإشعاعي للمواد غالبًا ما تَعتمد على:

- النوى الأولية يجب أن يكون لها فترة عمر نصف كبيرة، للحرص على أن تكون النوى الأولية موجودة بنسب ملحوظة في وقت قياس الإشعاع.
- تكون فترات عمر النصف معلومة مُسبقاً وبدقة عالية.
- يجب أن يكون قد تم إنتاج ما يكفي من النوى الثانوية حتى يمكن تحديد نسبتها بدقة والتفرقة بينها وبين الأولية.

يمكن استخدام هذه العلاقة الرياضية في تحديد نسبة التفكك الإشعاعي Radiometric Decay إلى الزمن الجيولوجي

$$D = D_0 + N(t)\,(e^{\lambda t} - 1)$$

t تعبر عن الوقت أو الزمن الجيولوجي.

D تعبر عن عدد ذرات النظائر الثانوية في العينة المأخوذة.

D_0 عدد ذرات النظائر الثانوية في المادة الأصلية.

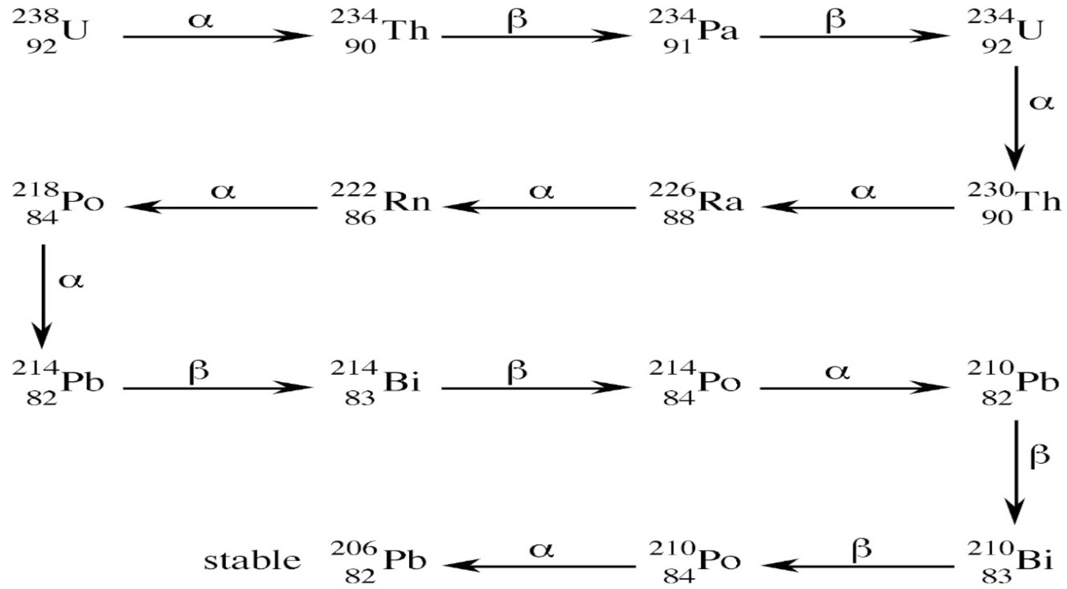
N عدد ذرات النظائر الأولية في العينة خلال زمن t.

λ ثابت التحليل الإشعاعي للمواد الأولية وهو يساوي معكوس فترة نصف العمر للعنصر الأولي مقسومًا على اللوغاريتم الطبيعي للعدد.

النظائر غير الثابتة والمشعة Radiogenic Isotopes

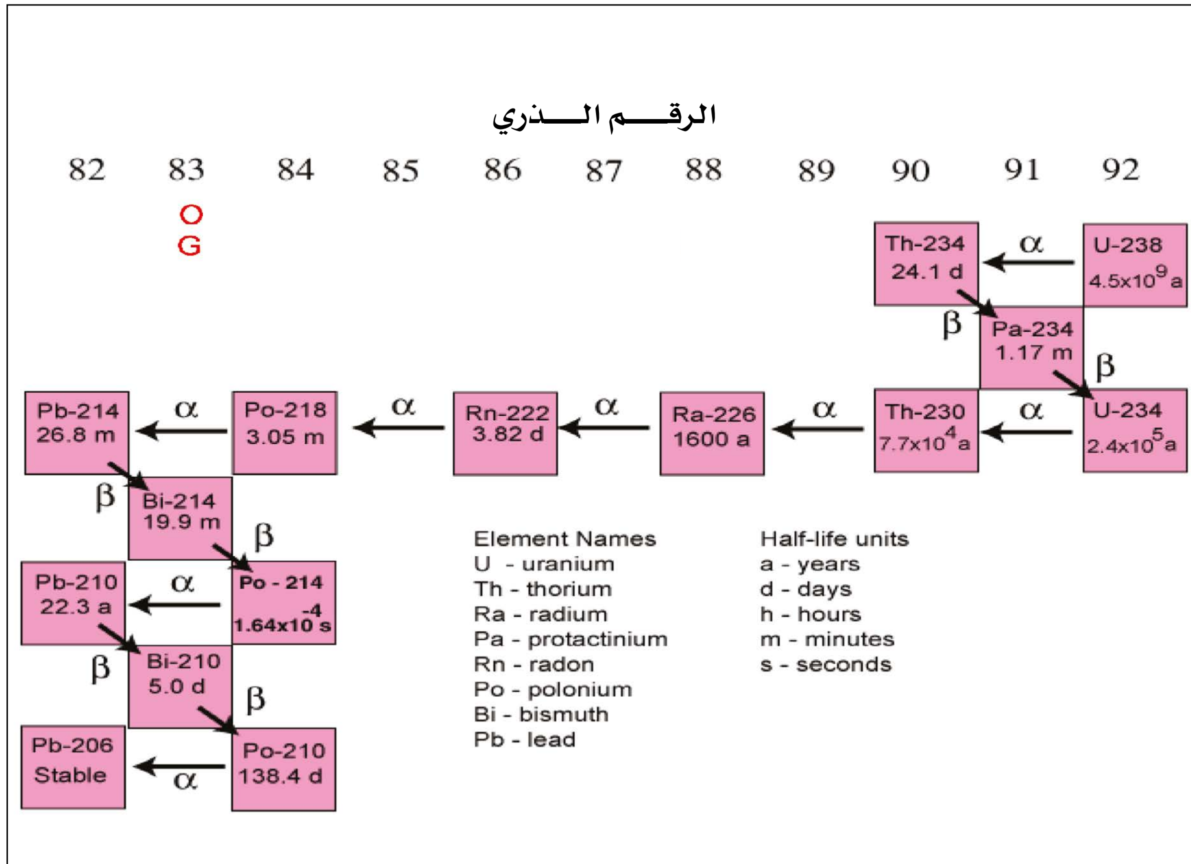
طريقه اليورانيوم - الثوريوم - الرصاص ^{238}U- ^{234}Th-^{206}Pb

أكثر طرق تحديد الاعمار تعقيدا لأنها عباره عن سلاسل إشعاع طويلة وذات إعمار انصاف كبيره وتستخدم في تحديد أعمار الصخور القديمة مثل عمر الأرض، وكذلك عمر الصخور الأصلية التي تكونت منها الصخور المتحولة. يعد اليورانيوم مثالاً على العناصر المشعة التي تتفكك من خلال سلسلة من العناصر الوليدة التي تستمر بالتفكك حتى الوصل إلى الوليد الثابت. يتميز اليورانيوم بوجود سلسلتين من التفكك، الأولى سلسلة اليورانيوم 238 التي تقود إلى تشكل الرصاص 206، والثانية هي سلسلة اليورانيوم 235، التي تقود إلى تشكل العنصر الوليد الرصاصي 207. فإذا بدأنا من 1 غ من اليورانيوم 235، فإنه سيبقى عند نهاية العمر النصفي نصف غرام منه وبعد انقضاء العمر النصفي من جديد يبقى ربع غرام، وفي الوقت نفسه تتزايد نسبة العنصر الوليد وهو الرصاص 207، لذلك فإن نسبة العنصر الوليد إلى العنصر الأصلي ستتزايد مع الزمن. اليورانيوم 238 وهو من العناصر المشعة غير الثابتة تتحل إلى ثوريوم 234 وهو يسمى العنصر الابنة لليورانيوم. والثوريوم ايضا هو مشع وغير ثابت فهو بدوره يتحلل إلى بروتاكتينيوم. يعتبر البروتاكتينيوم ابنة للثوريوم وأيضا هو غير ثابت وهو مشع فيتحلل إلى نوع آخر من اليورانيوم الذي يتحول بدوره إلى نوع آخر من الثوريوم وإلى راديوم وهكذا سلسلة تحللات حتى يصل في النهاية إلى الرصاص الذي لا يتحلل وهو ثابت. بعد 14 خطوة كما في الشكل التالي:



من الصعوبات التي تعترض هذه الطريقة هي معرفة فيما إذا كانت هناك أية نسبة من الرصاص الذي يمكن أن ينتج عن تفكك اليورانيوم موجودة أصلاً في الصخر قبل بداية عملية التفكك، وكذلك فيما إذا كانت العمليات الجيولوجية التي حدثت على مر الزمن أدت إلى ضياع أي جزء من اليورانيوم الأصلي في الصخر، أو أي جزء من العنصر الوليد، ومن الصعوبات أيضاً ندرة وجود العينات الصالحة للتحليل. على الرغم من الصعوبات التي تعترض تطبيق هذه الطريقة فإنها تعد طريقة ذات أهمية كبيرة في التاريخ الجيولوجي وهذا يعود من جهة إلى العمر النصفي الكبير لليورانيوم ومن جهة أخرى (وهذا شديد الأهمية) إلى وجود سلسلتي تفكك، تسمح كل منهما بتدقيق نتائج الأخرى فإذا تطابقت النتائج فإننا نكون أمام تاريخ صحيح للحدث الجيولوجي، أو الصخر الذي نقوم بتحديد عمره كما هو موضح في الجدول أدناه.





سلسلة تفكك اليورانيوم

يستخدم معدني الزركون والمونزايت في صوره محلول معالج كيميائيا أو في صوره بلورات كامله ويستخدم مطياف الكتلة حيث يجرى تحديد نسب النظائر المختلفة بواسطه أكثر من طريقه في هذا النظام. أهم هذه الطرق هي طريقه تبخير بلورات الزركون حيث تعلق بلوره الزركون في جهاز مطياف الكتلة ويتم قياس نسبه نظير الرصاص^{207} /الرصاص^{206} وبطرق حسابية طويلة ومعقدة يحسب العمر المطلق للصخر الحاوي على هذه البلورات. مميزات هذه الطريقة عدم عمل محلول كيميائي من المعدن أو الصخر بل يستعمل المعدن مباشره وبالتالي نتلاشى الخطأ الناتج من عمل محلول كيميائي يتدخل فيه الانسان بالإضافة إلى إمكانيه تحديد العمر للصخور التي تحتوى على نسبه بسيطة من بلورات الزركون مثل الصخور القاعدية والفوق قاعديه حيث أن ببلوره واحده يمكن تحديد العمر حيث تقاس مئات النسب في البلورة الواحدة اثناء تبخير مكوناتها. كذلك يمكن حساب عمر الصخر بهذه الطريقة عن طريق شعاع أيونى عالي SHRIMP يوجه لبلورات الزركون وتحسب الكثير من نسب النظائر أهمها نسب كل من اليورانيوم والرصاص المختلفة والكثيرة وباستخدامها يتم تعيين العمر المطلق.

توجد طريقه أخرى وهي عمل محلول من بلورات معدن الزركون المطحون ثم تجرى له قياسات طويله ومعقده بمطياف الكتلة وتقاس نسب نظير اليورانيوم إلى نظير الرصاص التي تحسب منها العمر المطلق.

توجد طريقه حديثه وهي (LA-ICP) Laser ICP وهي ليست منتشرة في العالم باستثناء بعض المعامل في الدول الكبرى وتقاس نسب النظائر المختلفة للمعدن مباشره من قطاع ميكروسكوبي رفيع وتستخدم في تحديد العمر واستنتاج الكثير عن أصل الصخر ونشأته.

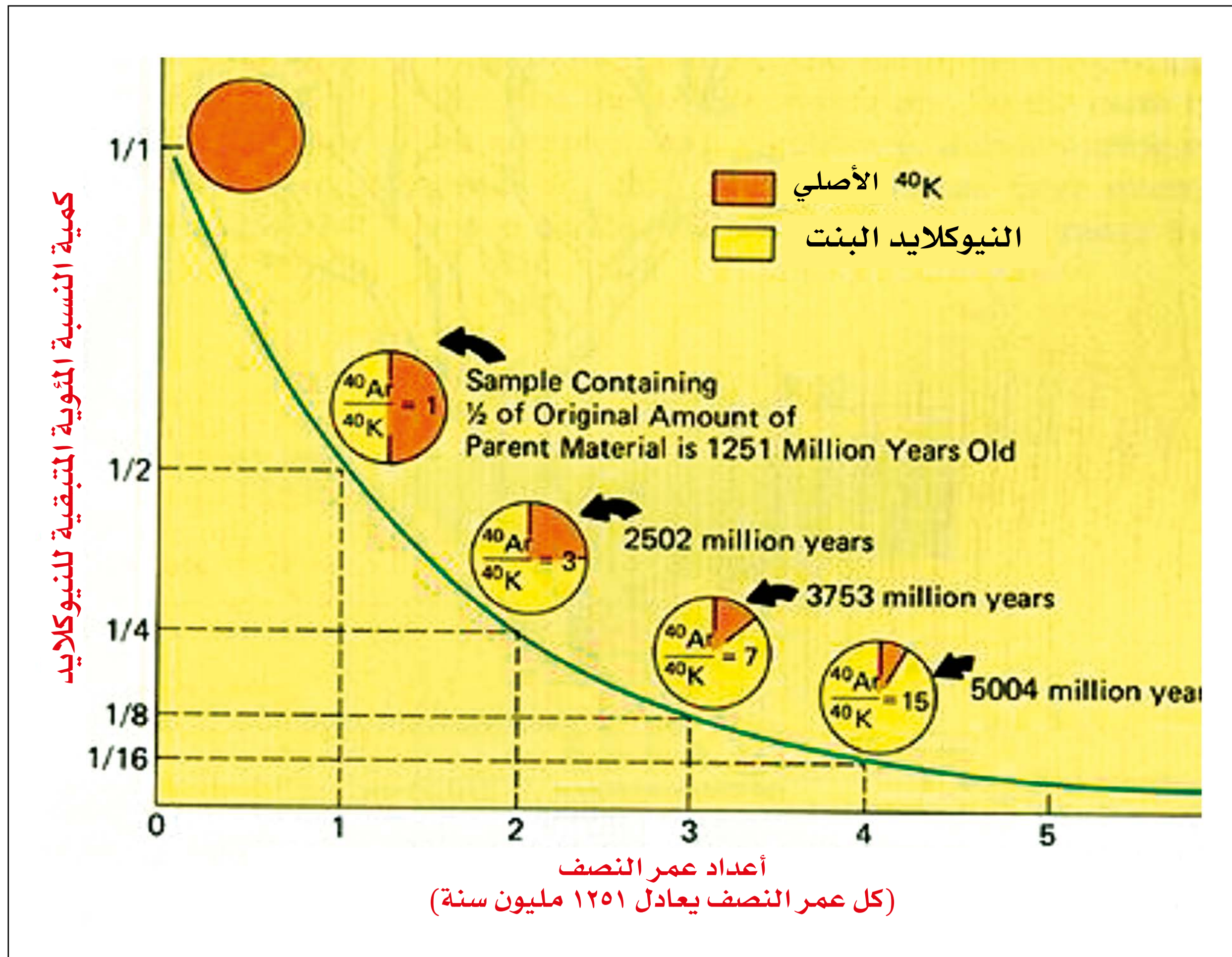
طريقـــة الروبيد يـــوم - الاسترنشيوم ^{87}Rb - ^{86}Sr

تستخدم هذه الطريقة في الصخور الغنية بمعادن البوتاسيوم وتستخدم في تحديد أعمار الصخور النارية وعمر تحول الصخور المتحولة وكذلك عمر الترسيب بعمل تحديد العمر للمعادن الناشئة بالترسيب مثل معدن الجلوكونيت. كذلك عن طريق نسبه $^{87}Sr/^{86}Sr$ Initial يمكن تحديد أصل الصخر حيث إن أكبر من 0.707 تكون ذات أصل قاري Crustal بينما إذا كانت تتراوح بين 0.702 حتى 0.704 تدل على أن أصل الصخر مشتق من قاع محيط (لوح محيطي) أو الوشاح Mantle Origin

$$\frac{^{87}Sr_{now}}{^{86}Sr_{now}} = \frac{^{87}Sr_{initial}}{^{86}Sr_{initial}} + \frac{^{87}Rb_{now}}{^{86}Sr_{now}} (e^{\lambda t} - 1)$$

طريقـــة البوتاســـــيوم ^{40} - ارجون ^{40}

تستخدم في الصخور النارية الغنية بالبوتاسيوم مثل الصخور الجرانيتية وتستخدم في تعيين عمر التحول بعمل تحديد عمر المعادن الناتجة من التحول في صخور الشيست وكذلك في تحديد عمر الصخور الرسوبية الحاوية على جليكونيت. لا تستخدم الطريقة في الصخور المتأثرة بالحركات التكتونية حيث أن الأرجون يتطاير، وبالتالي لا تعطى عمراً دقيقاً حيث إن ساعة الزمن والنظام أصبح مفتوحاً Open System كما هو موضح في الشكل المرفق.



العلاقــة بين أعداد عمر النصف والنسبة المئويــة للنيوكلايــد المتبقيــة في البوتاسيوم40 - ارجون40

طريقة النيودنيوم 143 - السماريوم 147

النيودنيوم (Nd) والسماريوم (Sm) عناصر تتبع مجموعه العناصر الأرضية النادرة التي لا تتأثر بالعمليات الجيولوجية مثل التحول أو التعرية وتجرى هذه الطريقة للصخر Whole Rock Isochrone أو للمعدن Mineral Isochrone وبخاصه معادن البيروكسين والجارنت؛ ولذا تستعمل في تحديد العمر المطلق للصخور فوق القاعدية والقاعدية وكذلك الفتات المكون للصخور الرسوبية القديمة أي عمر صخر المصدر Protolithes. فترة عمر النصف لهذا النظام كبيرة؛ لذا تستعمل في تحديد أعمار الصخور القديمة كذلك تستخدم في دراسة تطور القشرة الأرضية والمحيطية حيث إذا كانت ε Nd موجبه تدل على أن الصخور مشتقه من قشرة محيطية بينما إذا كانت سالبة تدل على أن الصخور مشتقة من أصل قاري. كذلك تستخدم في دراسة أصل الفتات الرسوبي الذى كون الصخور الرسوبية القديمة. قام الكاتب بعمل دراسات على العديد من الصخور التي تم التعرف على أصلها وكذلك عمرها.

طريقة الكربون 14 - النيتروجين 14

تصطدم الأشعة الكونية Cosmic Rays بذرات الغلاف الجوي باستمرار مما ينتج عنه أشعة كونية ثانوية في شكل نيوترون تحمل طاقة حركية، يتفاعل الكربون 14 المشكل مع الأكسجين ليشكل ثاني أكسيد الكربون، الذي سيصبح بدوره جزءاً من الدورة الطبيعية لثاني أكسيد الكربون، ويحل قسم منه في كل أنواع الكائنات الحية، وعندما تموت هذه الكائنات فإنها تتوقف عن استيعاب



أية كمية جديدة من الكربون بما فيها الكربون 14، وعندما يحدث هذا الأمر فإن كمية الكربون 14 تبدأ بالتناقص حيث تعود لتتحول إلى نيتروجين. تصطدم هذه النيوترونات بذرات النيتروجين 14 المكون من سبع بروتونات وسبع نيوترونات. ينتج عن هذا التصادم ذرة كربون 14 المكونة من ستة بروتونات وثمانية نيوترونات وتتحرر ذرة هيدروجين المكونة من بروتون واحد فقط. تعتبر ذرة الكربون 14 ذرة غير مستقرة، لأن عدد بروتوناتها لا يساوي عدد نيوتروناتها مما تسمي بـ «الكربون المشع» الذي له عمر نصف (وهو العمر اللازم لكي تقل كمية النشاط الإشعاعي إلى النصف) هو 5730 سنة.



$$n + 14N \rightarrow 14C + 1H$$

كربون 14 هو نظير من نظائر الكربون المشعة، وهو مصدر لأشعة (B) يتحلل بمرور الوقت. فإذا كان لدينا كمية معينة منه، بعد مرور 5730 عام يكون قد تحلل نصفها. وهذا ما ندعوه بعمر النصف، ويكون لنا هذا العمر بمثابة الأساس الذي نعتمد عليه في اعتبار كربون 14 كطريقة ناجحة في تحديد العمر. تستخدم طريقة الكربون 14 في تاريخ الأحداث الجيولوجية التي لا يزيد عمرها غالباً على 50.000 سنة، ويعود ذلك إلى العمر النصفي القليل للكربون 14. إن نسبة الكربون المشع إلى الكربون الطبيعي تظل ثابتة، ولكن بموت الكائن الحي فان نسبة الكربون المشع به تقل، وعن طريق دراسة نسبة الكربون المشع إلى نسبة الكربون غير المشع يمكن تحديد عمر بقايا هذا الكائن الحي بدقة. تذكر أن الكربون المشع يُستَخدم فقط لتحديد عمر الكائنات الحية ولكن لا يمكن استخدامه لتحديد عمر الصخور، مثل صخور القمر أو المذنبات. ولتحديد أعمار هذه الأشياء يتم استخدام تقنيات أخري مثل نظير البوتاسيوم 40.

النظائــر الثابتــة Stable Isotopes

يوجد العديد من هذه النظائر، مثل: الأكسجين والكربون والهيدروجين والسيلكون والكبريت والنيتروجين وهي ثابته أي لا ينتج عنها إشعاع.

• نظائر الأكسجين

وهي $^{16}O, ^{17}O, ^{18}O$ وتقاس بنسبه $^{18}O/^{16}O$ وتحسب مقارنة بمتوسط كميه النظير في ماء المحيط التي تساوى 1 وتسمى (Standard Mean Ocean Water) SMOW وتوجد في صوره $\delta\ ^{18}O$ وقد وجد أن معدل هذا النظير في الصخور أو المعادن يتراوح بين 2 إلى 36 % ويميز كل نوع من المعادن والصخور عن الآخر. ويستعمل نظير الأكسجين في عمل التقسيم الطبقي Isotope Stratigraphy للصخور الرسوبية المختلفة حيث توضع الحدود الفاصلة بين الطبقات اعتمادا على كميه نظير الأكسجين. أيضاً يستعمل في التعرف على درجة الحرارة التي يتكون عندها الخام بدراسة السوائل الموجودة في مكتنفات المعادن أو التفاعل الذى يتم بين الصخر والماء.

• نظير الهيدروجين

الهيدروجين يوجد له نظيرين هم الهيدروجين^{1} والديوتيريوم ^{2} وتقاس مقارنه.. بنسبته في ماء المحيط SMOW التي تساوى 1 وتوجد في صوره δ D وتتراوح بين 180 الى 20 % في المعادن والصخور المختلفة.

- **نظـــــير الكربـون**

نظيـر الكربـون الثابـت هـو الكربـون 13 والكربـون12 وتقـاس مقارنـة بنسـبته في معدن الكالسـيت المسـمى PDP وتسـمى $\delta\ ^{13}C$ وتتـراوح بـين 35 الـى 5 % وهـذا النظيـر يختلـف عـن الكربـون14 المشـع الـذى يسـتخدم في تعيين العمر المطلق للحفائر والمـواد العضويـة.

- **نظـــــير الكبريت**

يتواجـد للكبريـت 4 نظائـر هـم ^{36}S , ^{33}S, ^{32}S , ^{34}S . يوجـد في صـوره $(^{34}S/^{32}S)$ أو $\delta^{34}S$ ويتـراوح بـين 45 الـى 60 % وكل نـوع مـن الصخـور والمعـادن يحتـوى علـى كميـه محـدده ويمكـن تمييـز الانـواع المختلفـة منـه اعتمـاداً عليـه.

- **نظـــــير السيلكون** $(^{30}Si/^{28}Si)$

يميـز الأنـواع المختلفـة مـن الصخـــور والمعـادن وتتـراوح نسـبته بـين 2.2 الـى 3.2 %.

- **نظـــــير النيتروجين** $(^{14}N/^{15}N)$

يستخدم في دراسة محتوى النترات في المياه الجوفية والسطحية.

قيــاس عُمْـر الصخــور

النشـاط الإشـعاعي هو انحـلال تلقائـي لنـواة العنصـر الكيميائـي عـن طريـق إنبعـاث الطاقـة وجسـيمات (ألفـا، بيتـا، جامـا)، الأمـر الـذي يـؤدي إلـى نقـص في الكتلـة، فتتحـول النـواة إلـى نـواة عنصـر آخـر أكثـر اسـتقراراً، ويكـون معـدل هـذا الانحـلال ثابتـا لا يتغيـر، ولا يتأثـر بالظـروف الفيزيائيـة والكيميائيـة للبيئـة المحيطة بنـواة العنصـر المشـع، وهـذا ما يجعل هـذه الظاهرة على قدر مـن الأهمية لاسـتعمالها في تطبيقـات تحديـد أعمـار المعـادن والصخور. وقـد وجـد أن الزمـن الـذي يسـتغرقه انحـلال نصـف ذرات العنصـر المشـــع ثابـت، ويـسـمى عمـر النصـف (Half - Life) أو (نصـف الحيـاة). فمثلاً عمـر النصـف للراديـوم 224 هـو (1620) سـنة تقريبا. فـإذا وجـد جـرام واحـد مـن الراديـوم في عينـة صخـر، يبقـى منـه نصـف جـرام بعـد سـنة، وربـع جـرام بعـد 1620 سـنة أخـرى، وثمـن جـرام بعـد 1620 سـنة. بمعنـى أنـه بعـد انقضـاء عمـر النصـف الأول يتحلـل نصـف النظيـر المشـع، وبعـد فتـرة عمـر النصـف الثانـي يكـون نصـف الباقـي، أي ربع النظير المشـع قـد بقـى، أمـا بعـد أربـع فتـرات عمـر النصـف يكـون قـد تبقـى $(2/1)^4$ = (16/1) مـن النظيـر المشـع أي (16/15) منـه قـد تحـول إلـى النظيـر المسـتقر. إن قيـاس عمـر الصخـور، وبالتالـي معرفـة تتابعهـا ووضـع مقيـاس للزمـن الجيولوجـي، يتـم أمـا بالعمـر النسـبي (Relative Dating) أو بالعمـر الحقيقـي (Absolute Dating)، وكلا الأسـلوبين يعـد تابعـاً لعلـم التقويـم الجيولوجـي (Geochronology) الخـاص بتحديـد الأعمـار (Montgomery, 1997).

طريقة العمر الحقيقي Absolute Dating Method

تعتمد على تحديد العمر الحقيقي للطبقات بالسنين. في عام (1910) أقترح العالم فريدريك سودي (Frederick Soddy) اسم النظير (Isotope) الذي يعني (نفس المكان للتعبير) عن الذرات المختلفة في أوزانها الذرية لكنها متشابهة في أعدادها الذرية. لذلك يمكن تعريف النظائر بأنها ذرات نفس العنصر الكيميائي التي لها نفس العدد الذري (أي نفس عدد البروتونات) لكنها تختلف في العدد الكتلي (أي في عدد النيوترونات). إن مفهوم عدم استقرار النظير المشع يعني انحلال نواة الذرة تلقائياً لتكوين نواة ذرة عنصر آخر، لكن بحالة مستقرة وهذا ما يعبر عنه بالنشاط الإشعاعي (Radioactivity). وخلال هذه العملية تبعث من النواة أنواع مختلفة من الجسيمات على هيئة طاقة أو إشعاع، وبناءً على ذلك فإن النظير المشع الأصلي يدعى بالنظير الأم (Parent Nuclide) أما النظير الناتج من التحلل الإشعاعي فيدعى بالنظير البنت (Daughter Nuclide). إن عملية تحول النظير الأم إلى النظير البنت بواسطة التحلل الإشعاعي يتم بمعدل ثابت لا يتغير ولا يتأثر باختلاف الظروف الطبيعية والكيميائية المحيطة. معدل التحول هذا يدعى بثابت الانحلال (Decay Constant)، ولكل نظير مشع ثابت تحلل خاص به، على سبيل المثال ثابت انحلال اليورانيوم المشع (U238) هو ($7620x10^6$). أما زمن تحول نصف وزن النظير الأم إلى النظير البنت فيدعى بنصف العمر (Half-Life)، فمثلاً نصف عمر نظير اليورانيوم يبلغ حوالي (4560) سنة (الياس، 1993). يمكن حساب عمر الصخور أو أي مادة تحتوي على نظير مشع من خلال:

العمر = وزن النظير الأم / وزن النظير البنت X ثابت تحلل النظير

في الوقت الحالي يستخدم جهاز المطياف الكتلي (Mass Spectrometer) لحساب عمر الصخور، وهو جهاز يعتمد على المبدأ السابق في حساب العمر. من أبرز النظائر المستخدمة لحساب العمر هي: نظير اليورانيوم (U)، نظير البوتاسيوم (K)، نظير الأرجون (Ar)، نظير الروبيديوم (Rb)، نظير الكربون (C)، إلخ.



الســـاعات النـــووية

يطلق على العناصر المشعة التي تستعمل لقياس أعمار الصخور اسم «الساعات النووية»، وقد أمكن استخدامها في تحديد العمر المطلق للصخور بجميع أنواعها بشكل دقيق للغاية، وذلك في حالة تحقيق شرطين مهمين هما: أن يتم الانحلال بمعدل ثابت. وأن لا تفقد ولا تكسب العناصر ذات النشاط الإشعاعي نواتج الانحلال مرة أخرى. ويمكن قياس زمن معدن للتعرف على عمره بإجراء الآتي:

- **تحليل كيميائي لعينة من المعدن لتعيين كمية كل من النظير المشع والعنصر الناتج من الانحلال، مثل تعيين كميتي اليورانيوم والرصاص.**
- **تعيين الكمية النسبية لكل من النظائر الثابتة، إذا كان هناك أكثر من نظير واحد كما هو موضح في الجدول المرفق.**

العنصر المشع الأصلي	العنصر الثابت الناتج عن الانحلال الإشعاعي	عمر النصف
اليورانيوم $_{92}U^{238}$	رصاص $_{82}Pb^{206}$	4467 مليون سنة
اليورانيوم $_{92}U^{235}$	رصاص $_{82}Pb^{207}$	704 مليون سنة
البوتاسيوم $_{19}K^{40}$	آرجون $_{18}Ar^{40}$	1193 مليون سنة
الروبيديوم $_{37}Rb^{87}$	سترونشيوم $_{38}Sr^{87}$	48800 مليون سنة
الكربون $_{6}C^{14}$	نيتروجين $_{7}N^{14}$	5730 مليون سنة

يوضح الجدول عمر النصف لبعض النظائر المشعة المستخدمة في تحديد العمر المطلق

طريقـة العمـر النسبي Relative Dating Method

تعتمـد على تحديـد عمر الطبقــات الصخرية بالنســـبة لبعضها البعض دون معرفـــة العمر الحقيقـي لها، وذلك بالاعتماد على قانـــون تتابع الطبقات (Principle of Superposition)، الــذي وضعـــــه جيمـس هتـــون James Hutton (1726-1797)، الـذي ينـص علـى أنـه في أي تتابـع للصخـور المتطبقـة والتـي لـم تتعـرض للتشـويه بالتفلـق أو الطـي الشـديد، فـان الطبقـة التـي في الأسـفل تكـون أقـدم مـن الطبقـة التـي تعلوهـا، كمـا يمكـن الاسـتفادة مـن قانـون التتابـع الحيوانـي والنباتـي، ومـن المتحجـرات الدالـة لتحديـد العمـر النسـبي للطبقـات الصخريـة، خاصـة عندمـا تكـون معزولـة عـن بعضهـا، أي أن الطبقـات التـي تحتـوي علـى المتحجـرات القديمـة تكـون الأقـدم وتلـك التـي تحتـوي علـى المتحجـرات الحديثـة هـي الأحـدث.

يهتم العمر النسبي بدراسة التسلسل الزمني للأحداث والتغيرات، وأيضاً تطور الكائنات الحية، حيث إنها تمكنت من تحديد تطور الأرض منذ أن أصبحت جسم مكاني مستقل، يتم تحديد العمر أو التسلسل الزمني والأحداث الجيولوجية من خلال معرفة العمر النسبي والمطلق. يقصد بالعمر النسبي، تنظيم علاقة الطبقات بعضها ببعض، وتتمثل في ترتيب جميع الأحداث الجيولوجية بالشكل النسبي، وذلك من خلال استخدام العديد من المبادئ كالقاطع والمقطوع وتعاقب الأحافير من أجل تحديده، كما يُعطي العمر النسبي الطبقات بصورة غير دقيقة، حيث إنه يعطي عمراً نسبي للصخور من خلال تحديد ايهما أقدم وأيهما أحدث، ولكن قد لا يمكن معرفة عمر الطبقات بالسنوات، أيضاً قد لا يكون بسهولة أن يتم تحديد تسلسل الأحداث التي تؤدي إلى تكوين معين. يتم تحديد العمر النسبي للصخور من خلال استخدام البيانات من الصخور الرسوبية بشكل عام، إلا أنه يتم تحديد العمر النسبي للصخور المنصهرة والمتحولة بناء لعلاقتها بالصخور الرسوبية.

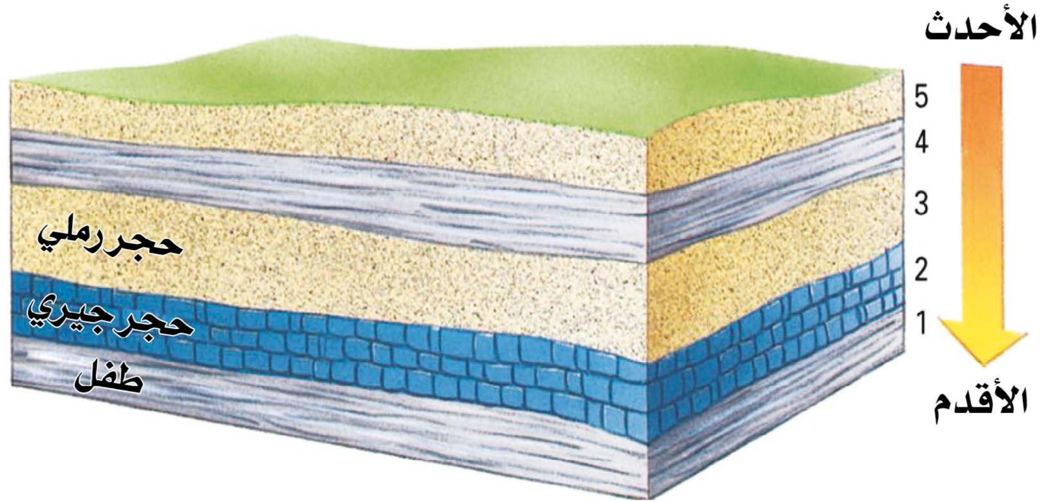
سلم الزمن الجيولوجي

يُعرف سلم الزمن الجيولوجي بأنه تقسيم لتاريخ الأرض وأحداثها بناءً على أشكال الحياة السائدة في أوقات محددة منذ نشأتها، وتسمى هذه الوحدات الزمنية المقسمة وحدات جيوزمنية، أو الوحدات الجيولوجية الزمنية (Geochronologic Units)، وقد عُثر على معظم أشكال الحياة القديمة هذه من خلال دراسة الأحافير، وهي بقايا أو آثار لكائنات حية عاشت في الماضي الجيولوجي وتم حفظ بقاياها في الرواسب أو الصخور عند موتها، حيث وفرت دراسة الأحافير إلى جانب الأدلة الجيولوجية والبيولوجية الأخرى؛ معلومات عن تاريخ الأرض وتطور الحياة، وذلك من خلال تقديم الأحافير معلوماتٍ عن الأعمار النسبية للطبقات الصخرية وبيئات الترسيب القديمة، وقد تم استخدام السجل الأحفوري لتطوير سلم الزمن الجيولوجي. من خلال ملاحظة العلاقات بين الوحدات الصخرية المختلفة؛ وصف العالم نيكولاس ستينو Nicolaus Steno عام 1669م عدة مبادئ جيولوجية أساسية تُستخدم في تحديد العمر النسبي للطبقات الصخرية، وهي :

- **مبدأ تعاقب الطبقات Principle of Superposition**

حيث إنه توجد العديد من الطبقات الأفقية، ومن خلال استخدام بعض المبادئ الأساسية من الممكن أن يتم حساب الأعمار النسبية للصخور، يقوم هذا المبدأ على أن الطبقة التي تكون في الأسفل هي الطبقة الأقدم، على أن تكون الطبقة العليا هي الأحدث، ويتخلص مبدأ التعاقب الطبقي أن كل طبقة رسوبية تكون أحدث من الطبقة التي أسفلها وأقدم من الطبقة التي تعلوها، وهذا المبدأ يمثل حجر الأساس في تحديد العمر النسبي للصخور.





مبدأ تعاقب الطبقات (الطبقة التي تكون في الأسفل هي الطبقة الأقدم)

• مبدأ الترسيب الأفقي Principle of Original Horizontality

ينص على أن طبقات الصخور تترسب بشكل أفقي. طبقات الصخور المترسبة من الأعلى، مثل الرواسب وتدفق الحمم البركانية، وضعت في الأصل أفقياً. الاستثناء من هذا المبدأ هو عند هوامش الأحواض، حيث يمكن للطبقات أن تنحدر قليلاً إلى أسفل الحوض.

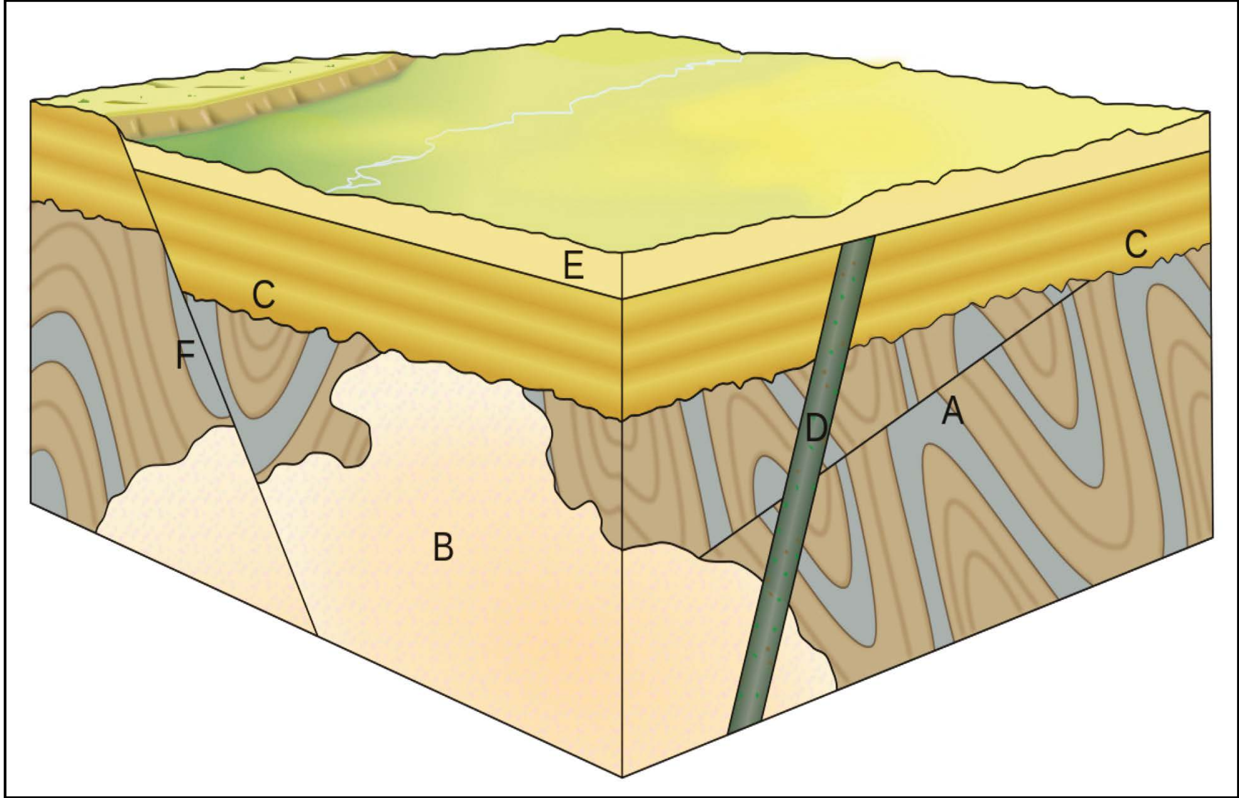
• مبدأ الاستمرارية الجانبية الأصلية Principle of Lateral Continuity

تترسب الصخور الرسوبية في أجسام ثلاثية الأبعاد، وتمتد أفقياً في كل الاتجاهات حتى تتلاشى عند حافة حوض الترسيب الذي تترسب فيه، أو تتغير خواصها إلى نوع آخر من الرواسب. ويتحدد امتداد الطبقات أفقياً من

خـلال عملية المضاهـاة Correlation فعندمـا تضاهـي المنكشـفات المنفصلة للوحـدة الصخريـة نفسـها بشـكل صحيـح، فإنهـا تـدل علـى أن هـذه المنكشـفات عبـارة عن أجـزاء ممـا كان وحـدة واحـدة متصلـة في الأسـاس. وتحمـل الطبقـات الرقيقـة الواسـعة الانتشـار التـي لهـا صفـات خاصـة مميـزة أهميـة زمنيـة، أي تعبـر عـن لحظة زمنيـة محددة يمكن اسـتخدامها كخطوط تعبـر عن التسـاوي الزمنـي عند إجـراء المضاهـاة. وتعتبـر هـذه الوحـدات الفيزيائيـة المتماثلة متزامنـة جيولوجيـاً علـى امتـداد منطقـة تواجدهـا، مثـل طبقات الرمـاد البركانـي.

• مبدأ العلاقات المتقاطعة Principle of Cross-Cutting Relationships

حيـث أن عمـر القاطـع يكـون أحـدث مـن عمـر الطبقـة المقطوعـة، حيـث إن الطبقـات التـي تتقاطـع مـع الطبقـات الأخـرى تكـون أصغـر مـن الطبقـات التـي تقطعهـا، وهـذا هـو مبـدأ العلاقـات الشـاملة، إذ أنـه ينـص هـذا المبـدأ علـى أن الجسـم الجيولوجـي الـذي يقطـع الصخـور الأخـرى يجـب أن يكـون أصغـر مـن السـمتين، أيضـاً الصـدوع والشـقوق التـي يظهـر علـى طولهـا انتقـال الصخـور مـن جانـب إلـى آخـر هـي أصغـر مـن الصـدع. في الرسـم البيانـي أدنـاه يجـب أن يكون القاطـع النـاري D أحـدث مـن الصـدع A والتداخـل النـاري B، لأنـه يتقاطـع مع هـذه الميـزات وغيرهـا.



مبدأ العلاقات المتقاطعة (القاطع أحدث من المقطوع)

• مبدأ الوتيرة الواحدة Law of Uniformatarianism

أوضح العالم جيمس هوتون James Hutton أن العمليات الطبيعية مثل تكوّن الجبال، والعمليات السطحية كالتعرية؛ حدثت ببطء وبمرور الوقت من خلال العوامل الجيولوجية التي كانت تعمل منذ تشكل الأرض التي لا تزال سائدة حتى الآن، ومع ملاحظاته وأفكاره توصل إلى ما يعرف باسم مبدأ (الوتيرة الواحدة) الذي ينص على أن العمليات الجيولوجية التي تحدث اليوم؛ حدثت

في طرق مماثلة في الماضي، مما يسمح للجيولوجيين بتحديد العمليات السابقة بناءً على التضاريس والعمليات التي تحدث اليوم وقد دحض العالم هوتون بذلك مبدأ الكارثية الذي اعتبر أن العمليات المختلفة كتكون الجبال قد تشكلت بسبب تغيرات كبيرة ومفاجئة أو بسبب الكوارث. هذه العمليات لم تتغير. على سبيل المثال، العمليات التي تنقل وترسب الرواسب في النهر هي نفسها اليوم كما كانت قبل مليار سنة. لذلك يتم التعبير عن مبدأ الوتيرة الواحدة على أنه «**الحاضر هو مفتاح الماضي**» الذي يوجه مبادئ علم طبقات الأرض.

• قاعدة التتابع الحفري Principle of Fossil Succession

لعبت قاعدة التتابع الحفري دوراً رئيسياً في تطور علم الجيولوجيا التاريخية، وهي تنص على أن كل طبقة أو مجموعة من الطبقات في التتابعات الرسوبية تحتوي على حفريات مميزة تختلف عما تحتها وما فوقها. وتمثل الحفريات Fossils بقايا كائنات حية قديمة أو آثارها، وهي تساعد كثيراً في تحديد العمر النسبي للصخور الرسوبية. وقد دعمت قاعدة التتابع الحفري قاعدة التعاقب الطبقي كثيراً، لأن الحفريات ليست كالحبيبات غير العضوية تتواجد عشوائياً، وإنما تتواجد بنظام محدد يمكن تتبعه. فأنواع الصخور يمكن أن تتكرر كثيراً في التتابعات الطبقية الرأسية بتكرار ظروف الترسيب، بينما تتغير المجموعات الحفرية رأسياً ولا تتكرر أبداً بسبب نظام التطور الذي لا يعيد الكائن المنقرض مرة ثانية. ويسمى هذا الترتيب الطبقي للحفريات بـ «التتابع الحفري».

تمكن العالم سميث من بيان أن لكل زمن جيولوجي أحافير خاصة به تميزه عن سواه من الأزمنة، كما أنه قام بوضع مبدأ التعاقب والمضاهاة، حيث إنه أصبح من المكن إيجاد العمر النسبي للصخور ومضاهاتها من قارة إلى أخرى، والمضاهاة تعني مطابقة الطبقات الصخرية في المناطق المختلفة من سطح الأرض من حيث نوع الصخور وعمرها، كما وتنقسم إلى مضاهاة أحفورية، ومضاهاة صخرية، فالمضاهاة الصخرية هي المضاهاة لطبقات صخرية التي تكون عبر مسافات قريبة، بحيث تعتمد على نوع الصخر، بينما المضاهاة الحفرية، فهي المضاهاة التي تعتمد على تشابه الأحافير في الطبقات الصخرية.

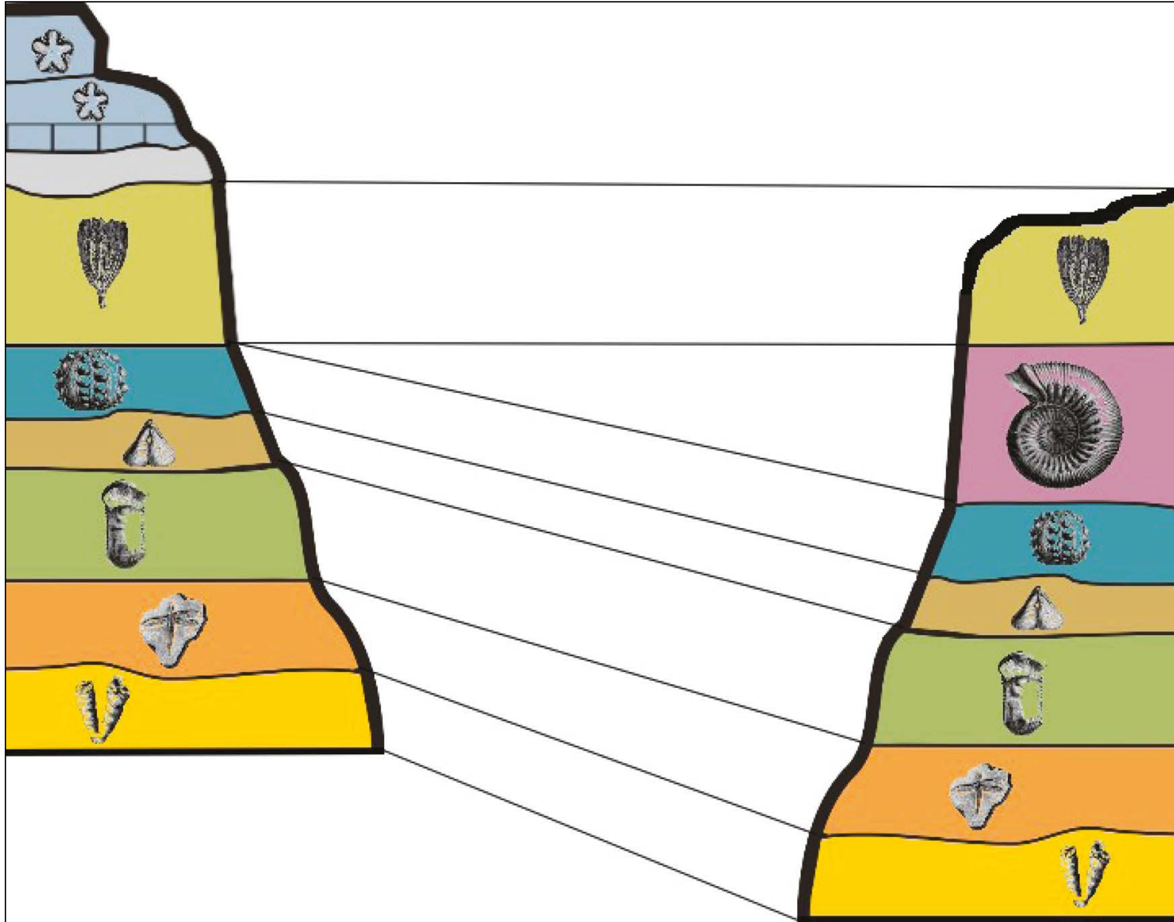
كما يمكن عمل المضاهاة بين الوحدات الصخرية عن طريق الوضع في التتابع الطبقي والطبقة الدالة Key Bed مثل طبقات الفحم والرماد البركاني. وتكون مثل هذه الطبقات مهمة عند عمل مضاهاة بين تتابعات صخرية، وبخاصة على نطاق إقليمي.

وتستخدم الحفريات للدلالة على زمن الوحدات الصخرية، حيث تمثل تلك الحفريات بقايا لكائنات حية عاشت لفترة زمنية خلال الزمن الجيولوجي الماضي. وتسمى الحفرية التي تستخدم في تحديد عمر الطبقات التي تحتويها، بالحفرية المرشدة (الدالة) Index Fossil ولكي تكون الحفرية مرشدة، فإنها يجب أن تكون شائعة في الطبقات، ولها توزيع جغرافي واسع، ومدى زمني محدود. ومن أحسن الأمثلة على الحفرية المرشدة الكائنات الحية الطافية التي تتميز بتطور سريع وانتشار جغرافي واسع.

• **قاعدة المكتفات (المتداخلات) Principle of Inclusions**

وهي تنص على أن الفتات والحبيبات التي توجد في صخر تكون أقدم عمراً من الصخر نفسه. فإذا احتوت طبقة ما على فتات من طبقة أو جسم ناري مجاور كانت تلك الطبقة الأخيرة أو الجسم الناري أقدم عمراً والعكس صحيح وبعد ذلك تم تحديد العمر النسبي للطبقات الصخرية، وهو عمر الطبقات بالنسبة لبعضها البعض وليس العمر الدقيق، أي (بملايين السنين) بل تحديد الأقدم والأحدث، وبعد ذلك تم تطبيق مبادئ تعاقب الطبقات المذكورة أعلاه باستخدام طريقة المضاهاة، إذ يمكن «مطابقة» طبقات الصخور، والتخمين بأنها قد تشكلت خلال نفس الفترة، ولذلك فهي عادة ما تكون في نفس العمر.





رسم تخطيطي يوضح الطبقات التي تحتوي على أحافير. خطوط تربط الطبقات بمحتوى أحفوري مكافئ.

الأحافيـر المرشـدة Index Fossils

هـي الحفريـات التـي توجـد بشـكل شـائع وكذلـك موزعـة علـى نطـاق واسـع وهـي الحفريات محدودة في هذه الفترة. هذه مفيدة في تحديد عمر الصخور العضوية وكذلك التجمعات الأحفورية الأخرى. ليس هذا فحسب، بل إنه يساعد أيضاً في إنشاء العلاقات بين الوحدات الصخرية وتحديد العمر النسبي والكشف عن البترول، وتسمى أيضاً الأحافير الإرشادية أو الحفريات الدالة. الأحافير المرشدة هي تلك الأحافير المفيدة للتأريخ وكذلك ربط الطبقات المختلفة التي وجدت فيها. تعيش بعض الأنواع في مكان وبيئة معينة ويتم الحفاظ على الحياة الحيوانية / النباتية في صخور الأرض التي هي سمة من سمات مدى معين من الزمن أو البيئة الجيولوجية. تُستخدم الأحافير المرشدة لتحديد المراحل الجيولوجية وكذلك الإشارة إليها. يستخدمها علماء كأدوات مساعدة مهمة لتحديد الارتباط وكذلك عمر أنماط الصخور. ويستخدم الجيولوجيون حفريات كبيرة للحفريات المجهرية لتحديد الزمن الجيولوجي. يستخدمون كلاً من الحفريات الكبيرة وكذلك الأحافير المجهرية أو الأحافير الدقيقة كمرشدات لتحديد الفترات الجيولوجية. إذا تحدثنا عن الأحافير الكبيرة، فإنها تتمتعون بميزة على الأحافير الدقيقة؛ لأنه من السهل رؤيتها والعثور عليها في الميدان، لكنها في الواقع نادرة في حين تستخدم صناعات الموارد المعدنية الأحافير الدقيقة بعد استخراج المعلومات المطلوبة من هذه الأحافير. هناك بعض أنواع الأحافير المرشدة التي تشمل الأمونيت Ammonites، وعضديات الأرجل Brachiopods، والخطيات Graptolites، والأحافير النانوية Nanofossils، وثلاثيات الفصوص Trilobites.

- **الأمونيت**: أحفورة الحيوانات البحرية القديمة تُعرف باسم «أحفورة مرشدة الأمونيت». خلال حقبة الدهر الوسيط، كانت شائعة (منذ 245 إلى 65 مليون سنة). بعد العصر الطباشيري، لم يتم العثور عليها لأنها انقرضت خلال انقراض K-T (قبل 65 مليون سنة).
- **عضديات الأرجل**: ظهرت قبل 550 مليون سنة. تأسست لأول مرة في العصر الكمبري. هذه حيوانات بحرية شبيهة بالرخويات، ظهرت خلال العصر الكمبري (540 إلى 500 مليون سنة) وبعضها لا يزال على قيد الحياة، وهي من أكثر الحفريات شيوعاً.
- **الخطيات**: إنها رقيقة ولامعة. تبدو العلامات على أسطح الصخور مثل علامات قلم رصاص. جاء اسم الخطيات من الكلمة اليونانية التي تعني «الكتابة على الصخور». هذه هي عبارة عن نصف حبليات Hemichordate بحرية استعمارية منتشرة. لقد عاشوا خلال فترة الكمبري تقريباً من (540 إلى 505 مليون سنة مضت) إلى أوائل منتصف العصر الكربوني (360 إلى 320 مليون سنة مضت). توجد في الصخر الزيتي والطين.
- **الأحافير النانوية**: هذه أحافير مجهرية (بقايا العوالق النانوية الجيرية، Coccolithophores) من عصور مختلفة. نظراً لمعدلاتها التكيفية، فهي خاصة بالزمن. الأحافير النانوية وفيرة جداً وتنتشر على نطاق واسع في المناطق. هناك أعداد مختلفة من الأحافير النانوية المفيدة التي تشمل المستحاثات الراديوية والمنخربات. حتى الوقت الحالي، تعتبر الرواسب البحرية هي الطرائق الأساسية.

- **ثلاثية الفصوص**: كانت شائعة خلال عصر الباليوزويك (540 إلى 245 مليون سنة). نحو نصف حفريات الباليوزويك هي ثلاثية الفصوص. في بداية العصر الباليوزويك، تكيفت بينما انقرضت خلال أواخر العصر البرمي، أي منذ 248 مليون سنة.

تتمتع الأحافير المرشدة بعددٍ من المزايا المختلفة منها:

- تستخدم هذه الحفريات من قِبل الجيولوجيين، وكذلك علماء الحفريات كمساعدات مهمة من أجل تحديد الارتباط وكذلك عمر تسلسل أو أنماط الصخور.
- إذا تحدثنا عن الأحافير الدقيقة، عند الحاجة، تجمع المعرفة الدقيقة من الحفريات، بعد ذلك، تستخدم بشكل عام من قِبل المنقبين عن النفط إلى جانب الصناعات الأخرى المهتمة بالموارد المعدنية.
- من خلال استخدام بعض الأساليب الفيزيائية أو البيولوجية، يمكن عمل الارتباطات الطبقية.
- يمكن أيضاً التحقق من التشابه الصخري بين وحدات الصخور المختلفة باستخدام واحد أو اثنين من طبقات العلامات.
- لقد ساعدت الأحافير المرشدة وقامت بدور حيوي في إنشاء نظرية الانجراف القاري. إذْ بسبب أدلة الأحافير المرشدة، تمكن ألفريد لوثار فيغنر من إنشاء وتقديم (فرضية الانجراف القاري) الخاصة به في عام 1912. ووفقاً لهذا، فإن جميع قارات العالم التي يمكننا رؤيتها اليوم

نشأت من قارة واحدة عملاقة، مثل بانجيا Pangea وتقسيم بانجيا إلى أجزاء أصغر، يؤدي إلى انحراف هذه القطع عن بعضها بعضاً منذ نحو 200 مليون سنة مما يؤدي إلى تكوين القارات الحالية. وقد وجد أن بقايا الحفريات، وكذلك بنية الصخور حول السواحل في أمريكا الجنوبية وأفريقيا والهند، كانت متشابهة مع بعضها بعضاً مع أنها انفصلت عن طريق المحيطات، مثل: المحيط الأطلسي والمحيط الهندي. حتى أحافير النباتات الاستوائية مثل السراخس والسيكاسيات وغيرها عُثر عليها في جزيرة القطب الشمالي. وبالتالي، فإن وجود الأحافير المرشدة يؤدي إلى التحقق من نظرية الانجراف القاري.

بصمــات المغناطيسية الأرضيــة القديمة

بصمات المغناطيسية الأرضية القديمة Palemoagetic Signatures من الإضافات المهمة التي حدثت في القرن العشرين إلى علم الطبقات اكتشاف بصمات المغناطيسية الأرضية القديمة في الصخور. حيث يظهر في صخور التتابعات الطبقية تتابع من أحداث القطبية المغناطيسية (أي اتجاه المجال المغناطيسي للأرض في وقت ما)، من القطبية العادية Normal Polarity أي مماثلة لاتجاه المجال المغناطيسي الحالي للأرض والقطبية المعكوسة Reverses Polarity أي يكون اتجاه المجال المغناطيسي عكس اتجاه المجال الحالي, حيث يكون قطب الأرض الشمالي متجهاً نحو الجنوب الحالي؛ ولقد تعرض المجال المغناطيسي للأرض للانقلاب كثيراً طوال تاريخ الأرض الطويل، كما تغير موضع الأقطاب المغناطيسية كثيراً جداً أيضاً بسبب حركة الكتل المتقاربة بالنسبة للأقطاب. وهذا يقدم وسائل أخرى لتقسيم التتابعات الطبقية، كما يمكن به إجراء المضاهاة بين التتابعات الطبقية المتباعدة أيضاً.

عـــدم التوافـــق Unconformity

من الظواهر الطبقية المهمة التي تفيد كثيراً في تحديد العمر النسبي والتاريخ الجيولوجي ما يعرف بـ «علاقة عدم التوافق»، ويعرف بأنه «سطح تعرية أو عدم ترسيب مدفون»، وبالتالي فهو يعبر عن جزء مفقود من السجل الجيولوجي نتيجة التعرية وعدم الترسيب. فعدم التوافق هو سطح بين طبقتين يفصل بينهما فاصل زمني. ويمكن تعرف أربعة أنواع من عدم التوافق، هي:

عدم التوافق التبايني Nonconformity

عدم التوافق التبايني وهو سطح طبقي يفصل بين صخور متبلورة (نارية أو متحولة) أقدم عمراً وأخرى رسوبية أحدث عمراً.

عدم التوافق الـزاوي Angular Unconformity

عدم التوافق الزاوي وهو سطح تعرية يفصل بين مجموعتين من الطبقات مختلفتين في زاوية الميل.

عدم التوافق التخالفي Disconformity

عدم التوافق التخالفي وهو نوع يصعب تعرفه، حيث يوجد سطح تعرية متعرج الشكل بين طبقات متوازية، وفيه يقطع سطح عدم التوافق أسطح الطباقية، ويكون الشاهد عليه وجود دليل على حدوث عملية تجوية مثل وجود فتات من الصخور التي تليه في الصخور التي تعلوه، مثل صخر الكونجلومرات.

شـــبه التوافـــــــــق Paraconformity

شبه التوافق وهو أصعب أنواع عدم التوافق، حيث يعتمد تعرفه على اختلاف عمر الطبقات التي تليه عن الطبقات التي تعلوه، ويكون الشاهد عليه اختلاف المحتوى الحفري لكلا التتابعين أسفله وأعلاه. ويعبر عن الفترة الزمنية المقابلة لعدم التوافق بثغرة ترسب (الثلمة) Hiatus، وهي تساوي الفرق في الزمن بين الصخور التي تقع فوق سطح عدم التوافق وتلك التي تقع تحته. وتجدر الإشارة إلى أن سطح عدم التوافق يمثل غياباً لفترة زمنية طويلة جيولوجياً. أما إذا كانت الفــترة المفقـــودة من التتابـــع الطبقـــي قصيرة فإننـــا نشير إليها بالفصلة Diastem وفي العادة فإن عدم التوافق يشير إلى فقد لفترات من السنين، بينما تعبر عن فقد لفترات زمنية قصيرة نسبياً تصل إلى أسابيع أو شهوراً أو حتى قرون.

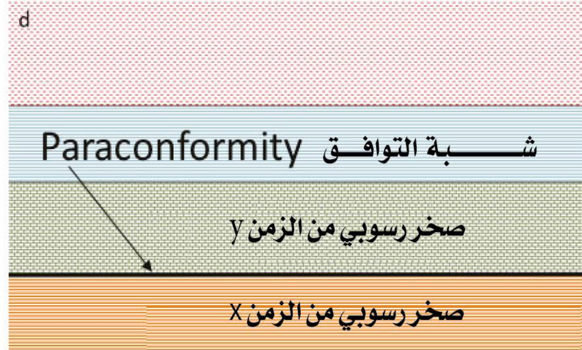
وتسـمح القواعـد الأساسـية السـابق ذكرهـا بتحديـد العمـر النسـبي بالنظـر إلـى مجموعـة رأسـية مـن الطبقــــات، أو إلــى أي تتابـع طبقـي (اسـتراتجرافي) Stratigraphic Sequence علـى أنـه سـجل مرتـب زمنياً للتاريخ الجيولوجي لمنطقة مـا. ويسـمى الخـط الزمنـي المقابـل والموضـوع علـى أسـاس هـذا التتابع بالزمـن الجيولوجـي Geologic Time، وهـو الممثـل زمنيـاً لهـذا التتابـع، أي كسـجل جزئـي كامـل للوقـت الـذي انقضـى منـذ ترسـبت أقـدم الطبقـات في أسـفل التتابـع إلـى أحـدث الطبقـات في أعلـى التتابـع (يسـتخدم مصطلـح الزمـن الجيولوجـي أيضـاً للإشـارة إلـى الفتـرة الزمنيـة الممتـدة، منـذ انتهـاء تكويـن الأرض ككوكـب منفصـل حتـى بدايـة التاريـخ المكتـوب). وتختلـف التتابعـات الطبقيـة عـن التتابعـات الرسـوبية فالتتابعـات الرسـوبية هـي تغيـرات رأسـية في التركيـب الصخـري للرواسـب المتكونـة في بيئـة ترسـيب واحـدة. أمـا التتابـع الطبقـي فهـو أشـمل في التعريـف ويضـم طبقـات

واسعة التغيير لكل منها أصل مختلف. وبينما يتم التأكيد في التتابعات الرسوبية على طبيعة الأنواع المتتابعة من الرواسب فإن التأكيد في التتابعات الطبقية (الإستراتجرافية) يكون على التتابع الزمني للطبقات المكونة للتتابع وظروف الترسيب.









أشكال عدم التوافق Unconformity

العمــــود الجيولوجــي

هـو مصطلـح يطلـق على التتابع الكامـل لجميع الصخور التـي تكون القشـرة الأرضية مـن أقـدم مكوناتهـا حتـى أحدثهـا ويسـتعمل نفس المصطلـح أحيانـاً للدلالـة علـى التتابـع الصخـري الكامـل الممثـل في منطقـة معينـة. ينقسـم تاريـخ الأرض إلـى مجموعـة هرميـة مـن التقسـيمات لوصـف الزمـن الجيولوجـي؛ وهـي: دهـر، وحقبـة، وعصـر، وفتـرة، ويوضـح الجـدول سـلم الزمـن الجيولوجـي ويظهـر دهـر الحيـاة علـى طـول الجانـب الأيسـر مـن الجـدول، ويمثـل الوقـت الـذي عاشـت خلالـه غالبيـة الكائنـات الحيـة الدقيقـة، مثـل: الطحالـب، والفطريـات، والنباتـات والحيوانـات، وعـادةً مـا يُشـار إلـى الوقـت الـذي يسـبق دهـر الحيـاة الظاهـرة علـى أنـه عصـر مـا قبـل الكمبـري، وتـم تقسـيمه إلـى الحقـب الثلاثـة الموضحـة في الجـدول.

يتكون دهر الحياة الظاهرة من ثلاثة أقسام رئيسية، وتعكس هذه التقسيمات تغييرات كبيرة في بيولوجية الحيوانات القديمة، حيث يتم التعرف على كل عصر من خلال هيمنة مجموعة معينة من الحيوانات، ويُطلق على حقبة الحياة الحديثة أحيانًا اسم «عصر الثدييات»، وحقبة الحياة المتوسطة اسم «عصر الديناصورات»، ويطلق على حقبة الحياة القديمة اسم «عصر الأسماك»، ولكن لا يعني ذلك أن هذه الأنواع من الحيوانات فقط كانت سائدة في كل حقبة، فمثلًا، بالإضافة إلى الديناصورات، عاشت أيضًا حيوانات، مثل: الثدييات، والسلاحف، والتماسيح، والضفادع، وأنواع لا حصر لها من الحشرات على الأرض خلال حقبة الحياة المتوسطة. بالإضافة إلى ذلك، تم وضع النباتات وتغيراتها في عين الاعتبار في سلم الزمن الجيولوجي؛ حيث كان هناك العديد من أنواع النباتات التي عاشت في الماضي وانقرضت، كما أنها مرت بتغييرات كبيرة أيضًا لم تكن مرافقة لتغييرات في المملكة الحيوانية.

		العصر أو الفترة وأطوالها	البداية (سنوات مضت)	تطور الحياة على الأرض	
حقب الحياة الحديثة	العصر الرابع	فترة الهولوسين 11.5 ألف سنة	١١.٥٠٠	اصطاد البشر الحيوانات وروضوها. وطوروا الزراعة وتعرفوا على استخدام الفلزات والفحم الحجري والغاز والمصادر الأخرى. واستغلوا طاقة الرياح والأنهار للعمل.	المحاصيل المنتجة
		فترة البليستوسين ٢ مليون سنة	٢ مليون	انتشر الماموث ووحيد القرن ذو الصوف وحيوانات أخرى ولكنها انقرضت بنهاية هذه الفترة.	القرود
	العصر الثالث	فترة البليوسين ٣ مليون سنة	٥ مليون	الحياة البحرية أصبحت كيوما هذا. والطيور والثدييات أصبحت مثل الأنواع الحديثة وانتشرت حول العالم وظهرت حيوانات شبيهة بالإنسان.	الخيول
		فترة الميوسين ١٩ مليون سنة	٢٤ مليون	ظهرت القردة العظمى في آسيا وإفريقيا. وتشمل الحيوانات الأخرى الخفافيش والقردة والحيتان والدببة الأولية والراقون وأخذت النباتات المزهرة والأشجار تشبه الأنواع الحديثة.	القرود
		فترة الأليجوسين ١٠ مليون سنة	٣٤ مليون	ظهرت القردة الأولية. تطورت الجمال والقطط والكلاب والفيلة والخيول ووحيد القرن والقوارض. اختفت الحيوانات التي تشبه وحيد القرن بنهاية هذه الفترة.	الخيول الأولى
		فترة الأيوسين ٢١ مليون سنة	٥٥ مليون	كثرت الطيور والبرمائيات والزواحف الصغيرة والسمك. ظهرت الخفافيش الأولية والجمال والقطط والخيول والقرود ووحيد القرن والحيتان.	الأعشاب
		فترة الباليوسين ١٠ مليون سنة	٦٥ مليون	كثرت النباتات المزهرة. شاعت اللافقاريات والسمك والبرمائيات والثدييات.	الثدييات الصغيرة
حقب الحياة المتوسطة		العصر الطباشيري ٨٠ مليون سنة	١٤٥ مليون	ظهرت النباتات المزهرة. كثرت اللافقاريات والسمك والبرمائيات. شاعت الديناصورات ذوات القرون والمصفحة. بدأت الديناصورات تنقرض بنهاية هذا العصر.	النباتات المزهرة
		العصر الجوراسي ٦٨ مليون سنة	٢١٣ ملايين	كثرت الأشجار الصنوبرية. شملت الحياة البحرية الحبار القشري. بلغت الديناصورات أكبر حجم لها. ظهرت أولى الطيور. الثدييات كانت صغيرة وبدائية.	الطيور
		العصر الترياسي ٣٥ مليون سنة	٢٤٨ مليون	كثرت الأشجار الصنوبرية. كثير من الأسماك كانت تشبه الأسماك الحديثة وكثرت الحشرات. ظهرت أولى السلاحف والتماسيح والديناصورات كأول الثدييات.	الديناصورات
حقب الحياة القديمة		العصر البرمي ٣٨ مليون سنة	٢٨٦ مليون	ظهرت أولى النباتات البذرية ـ الأشجار الصنوبرية ـ كثرت الأسماك والبرمائيات والزواحف بكثرة.	نباتات بذرية
	العصر الكربوني	العصر الكربوني العلوي ٤٠ مليون سنة	٣٣٠ مليون	شاعت الأشجار الحرشفية والسراخس والأسل العملاق وظهرت أولى الزواحف وعاشت الحشرات العملاقة في الغابات حيث تكون الفحم فيما بعد.	الزواحف
		العصر الكربوني السفلي ٣٠ مليون سنة	٣٦٠ مليون	انقرضت تقريباً ثلاثيات الفصوص (الترايلوبيت). وكثرت القشريات والسمك والبرمائيات. تكونت كثير من الشعاب.	البرمائيات
		العصر الديفوني ٥٠ مليون سنة	٤١٠ مليون	نمت أولى الغابات في المستنقعات. سبحت أنواع كثيرة من الأسماك تشمل القرش والسمك المصفح والرئوي في البحر والمياه العذبة. ظهرت أولى البرمائيات والحشرات.	الأسماك
		العصر السيلوري ٣٠ مليون سنة	٤٤٠ مليون	ظهرت أولى النباتات البرية ذوات الأنواع. شاعت ثلاثيات الفصوص والرخويات. تكونت الشعاب المرجانية.	المرجان
		العصر الأوردفيشي ٦٥ مليون سنة	٥٠٠ مليون	شاعت ثلاثيات الفصوص والمرجانيات والرخويات. عاشت الحيوانات الخطية (الجرابتوليت) في مجموعات متفرعة.	مطلبات (منقرضة)
		العصر الكمبري ٣٩ مليون سنة	٥٤٤ مليون	كثرت الأحافير لأول مرة. كانت حيوانات قشرية تسمى ثلاثيات الفصوص وبعض الرخويات شائعة في البحر. ظهور سمك عديم الفك.	ثلاثيات الفصوص
		زمن ما قبل الكمبري ٤ بلايين سنة تقريباً (؟)	٤,٥ مليون (؟)	عاش المرجان والسمك الهلامي والديدان في البحر قبل ١١٠٠ مليون سنة تقريباً. عاشت البكتريا قبل ٣,٦ بليون سنة. وقبل ذلك لم تعرف أشياء حية.	البكتريا

العمود الجيولوجي يطلق على التتابع الكامل لجميع صخور القشرة الأرضية

من خلال العمود الجيولوجي يمكن الربط بين التتابعات الطبقية التابعة لزمن واحد. ولقد تمكن الجيولوجيون من خلال عملية المضاهاة على مستوى العالم - من جمع عمود جيولوجي Geologic Column، هو عبارة عن قطاع رأسي مركب، يحتوي تتابع الطبقات المعروفة في ترتيب زمني على أساس محتواها الحفري، أو أي أدلة أخرى على العمر النسبي. وما زال يضاف إلى هذا المقياس العالمي، أو يتم إدخال تحسينات عليه حتى الآن، نتيجة وصف أو رسم خرائط لوحدات صخرية أكثر.

وحــدات الزمن الجيولــوجي

يقسم الجيولوجيون كل التاريخ الجيولوجي إلى وحدات مختلفة المدى الزمني تقابل الوحدات الصخرية للعمود الجيولوجي. وتشمل في مجموعها مقياس الزمن الجيولوجي Geologic Time Scale لتاريخ الأرض. ونظراً لأن تحديد العمر المطلق باستخدام المواد المشعة لم يكن معروفاً في ذلك الوقت، فإنه مقياس الزمن قد أقيم باستخدام طرق قياس العمر النسبي. وقد أضيفت التقديرات المطلقة لوحدات مقياس الزمن بعد إجازتها في القرن العشرين.

إن الدهــر الذي بدأ قبل 570 مليون سنة دهر الحياة الظاهرة Phanerozoic Eon وهو مصطلح مشتق من الكلمات اللاتينية التي تعني حياة ظاهرة، وهو وصف مناسب، لأن صخور ورواسب ذلك الدهر تحوي الكثير من الحفريات التي تسجل الاتجاهات التطورية الرئيسية في الحيــاة. ويقسم دهر الحياة الظاهـــرة إلى ثلاثة أحقاب Erathems/Eras هي: حقب الحياة القديمة Paleozoic، وحقــب الحياة المتوسطة Mesozoic، وحقب الحياة الحديثة Cenozoic وتعكس هذه الأسماء اختلافات واضحة في شكل الحياة على مستوى العالم عند الحدود بين الأحقاب. وينقسم كل حقب من الأحقاب الثلاثة إلى وحدات زمنية تسمى عصور Systems/Periods.

ينقسم حقب الحياة القديمة إلى ستة عصور، وحقب الحياة الوسطى إلى ثلاثة عصور، وحقب الحياة الحديثة إلى عصرين. وتختلف الحياة من عصر إلى عصر، إلا أن هذه الاختلافات تقل عن تلك الاختلافات التي توجد بين حقب وحقب. كما يقسم كل عصر من العصور إلى أقسام أصغر، ويطلق عليها الأحيان Series/Epochs بينما يقسم الحين إلى أعمار Stages/Ages وتعتبر أصغر الوحدات وتدوم من 2 إلى 10 مليون سنة.

مثـــال	التعريـــف	وحدة الزمن الجيولوجي Geochronologic	وحدة الزمن الطبقـــــي Chronostratigraphic
• دهر اللا حياة • دهر الحياة السحيقة • دهر الحياة الأولية • دهر الحياة الظاهرة	أطول وحدات مقياس الزمن الجيولوجي وقسمت إلى أربعة دهور	Eon الدهر	Eonothem قسم صخري
• حقب الحياة القديمة • حقب الحياة المتوسطة • حقب الحياة الحديثة	وحدة زمنية أصغر من الدهر وقسم المقياس حقب الحياة الظاهرة إلى ثلاث حقب.	Era الحقب	Erathem مجموعة صخرية
الكامبري – الأوردفيشي – السليوري – الديفوني	وحدة أصغر من الحقب وقسم المقياس الى 11 عصر.	Period العصر	System نظام
الباليوسين – الأيوسين – الأولوجوسين	أجزاء أصغر من العصور وقسم المقياس إلى 7 أحيان	Epoch الحين	Series سلسلة
	يقسم الحين إلى أعمار وتعتبر أصغر الوحدات وتدوم من 2 إلى 10 مليون سنة	Age العمر	Stage مرحلة

وحدات المقياس الزمني الجيولوجي **Geochronological Time Units**

لا يمكن عمل تقسيم تفصيل لمقياس الزمن الجيولوجي إلا في 570 مليون سنة الأخيرة من عمر الأرض، التي تحتوي على بقايا الحياة الهيكلية المعقدة، وتمتد من بداية العصر الكمبري حتى الآن. وتقسم الأربعة بلايين سنة من عمر الأرض، والتي تسبق العصر الكمبري إلى ثلاثة دهور Eonothems/Eons

وهي الهاديان Hadean والأركي Archean والبروتيروزي Proterozoic. وكثيراً ما يطلق على هذه الفترة الزمنية الطويلة من عمر الأرض وبصورة غير رسمية مصطلح ما قبل الكمبري Precambrian وعلى الرغم من أنه يمثل نحو 87 % من عمر الأرض، فإنه لا يقسم إلى أقسام كثيرة كتلك التي تكون في دهر الحياة الظاهرة. ويرجع السبب في عدم تقسيم الفترة الزمنية الطويلة التي يشملها ما قبل الكمبري إلى أحقاب وعصور وأحيان كثيرة إلى أننا لا نعرف كثيراً عن تاريخ ما قبل الكمبري. حيث لم يبدأ الانتشار الواسع للحياة في السجل الجيولوجي إلا من بداية العصر الكمبري. أما ما قبل الكمبري فقد انتشرت أشكال بسيطة من الأحياء، مثل: البكتريا والطحالب والفطريات والديدان. وهي أشكال من الأحياء لا تحتوي على هيكل صلب، الذي يمثل أحد المتطلبات الأساسية لحفظ الكائنات الحية كحفريات. ولهذا السبب فإن السجل الحري في ما قبل الكمبري يعد هزيلاً.

ساعة الأرض الرملية

ربما بدافع من ورقة كلفن السابقة (1864م)، حاول العديد من الجيولوجيين المشهورين في ذلك الوقت تحديد علمهم الوليد من خلال تقدير عمر الأرض من إجمالي سمك طبقات العمود الجيولوجي المعروف. يسرد الجيولوجي البريطاني آرثر هولمز A. Holmes (توفي 1965م)، في كتابه عصر الأرض (1913م)، تسع عشرة محاولة من هذا القبيل بين عامي 1860م و 1909م.

الطريقة الطبقية بسيطة من حيث المبدأ؛ إذا كان سمك السجل الطبقي معروفاً وكان معدل ترسب الطبقات مقدّراً أو مفترضاً (بالسنوات لكل وحدة سمك)، فإن وقت تجميع الطبقات هو ببساطة:

عمر الأرض = سمك الرواسب × معدل الترسب

تماشياً مع نظرية الوتيرة الواحدة، افترض هؤلاء الجيولوجيون معدل ترسيب ثابت في جميع أنحاء العمود الجيولوجي؛ لكنهم اختلفوا فيما بينهم على هذا المعدل. كما لاحظ آرثر هولمز «أثبتت الوتيرة الواحدة تقدماً كبيراً، ولكن بالتفصيل من المناسب أن يضلنا إذا جرى تطبيقه بشكل دوغمائي جداً». استبعدت معظم هذه التقديرات الرسوبية صخور ما قبل العصر الكمبري، التي لم يُعرف عنها سوى القليل في ذلك الوقت؛ ولكن كما نعلم حالياً، تبلغ هذه الفترة نحو 88 % من كل الزمن الجيولوجي، لذلك لم يكن لهذه التقديرات فرصة أن تكون قريبة من التصحيح. من المثير للاهتمام متابعة محاولات أحد الجيولوجيين لتأريخ السجل الرسوبي لحقب الحياة البرية (الكمبري إلى الحديث).

كان وليم جونسون سولاس W. J. Sollas (توفي 1936م) مهتماً بمسألة عمر الأرض ونشر ثلاث أوراق بحثية بناءً على السجل الطبقي للموضوع. جرى تلخيص تقديرات العمر المستمدة من **سولاس** في منشوراته في الجدول التالي:

تاريخ النشر	سماكة طبقية (10^3 متر)	معدل الترسيب (سنة / متر)	العمر (مليون سنة)
1895	50	328	17
1900	81	328	26.5
1909	102	328	80

نتائج الدراسات الطبقية التي قام بها سولاس (O'Hara, 2018).

مع توفر المزيد من المعلومات الجيولوجية، زاد سمك العمود الطبقي في أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين، لكن العمر التقديري لسولاس زاد بعامل أكبر بكثير في دراسته عام 1909. في الدراستين الأوليين، جرى حساب الرواسب الكمبرية والأصغر سناً فقط. في أحدث دراسة (1909)، أعطى العمر الذي جرى الحصول عليه بضرب العمود 2 في العمود 3 من الجدول عمراً قدره 33.5 مليون سنة فقط. نظراً لأن هذا أقل بكثير من عمر المحيطات الذي حسبه جولي أعلاه (90 مليون سنة)، كانت هناك مشكلة خطيرة بالنسبة لسولاس حيث ترسبت الرواسب بالكامل تقريباً في المحيط مما يعني فترة زمنية طويلة خالية من أي ترسب محيطي.

زاد سولاس تقديره إلى 80 مليون سنة من خلال طريقتين: لقد شمل وقتاً لرواسب ما قبل الكمبري (أضاف 17.5 مليون سنة بعد مناقشة البيانات الجيولوجية المتفرقة)، ثم قام بتضمين زمن الطبقات المفقودة في حالات عدم المطابقة. بعد مناقشة البيانات الجيولوجية لستة حالات عدم توافق رئيسة، أضاف 24 مليون سنة ولخمسة حالات عدم توافق طفيفة أضاف 5 ملايين، وبذلك يصل المجموع إلى 80 مليون سنة.

نظراً لأنه لم يُعرف سوى القليل جداً عن طبقات ما قبل الكمبري والوقت المفقود الذي يمثله عدم المطابقة، يمكن اعتبار هذه الإضافات مجرد تخمينات بدلاً من كونها إشارة إلى اتفاق بين عمر المحيطات بناءً على تقدير جولي والسجل الطبقي. قدم سولاس هذه النتائج في خطابه السنوي للجمعية الجيولوجية في عام 1909م. هناك، يضع تعليقه التمهيدي وضع الجيولوجيين في سياقهم التاريخي: «لقد توقفت مسألة الزمن الجيولوجي عن أن تكون سبباً للعيب بالنسبة لنا، ولم نعد نشتبه في وجود حساب مكشوف في بنك الوقت المجازي: في الواقع، بما أن الفيزياء، بلغة البورصة، قد تخلت عنها دور الدب في دور الثور، يبدو أننا مهددون بالإحراج الجديد المتمثل في وجود المزيد من الوقت بين أيدينا مما نعرف كيفية التخلص منه».

كان سولاس يشير بالطبع إلى جدل كلفن عندما سُمح للجيولوجيين فقط بنحو 25 مليون سنة من الزمن، وإلى فترة اكتشاف ما بعد النشاط الإشعاعي حيث كانت أعمار المعادن الإشعاعية تعطي حالياً أعمار تزيد على مائة مليون سنة فقط بعد عقد من الزمان. اكتشاف النشاط الإشعاعي في أواخر تسعينيات القرن التاسع عشر. هذا المجال البحثي الناشئ حديثاً سيؤدي في النهاية إلى التقدير الصحيح لعمر الأرض (O'Hara, 2018).

مشكلات تحديد الأعمار في مقياس الزمن الجيولوجي

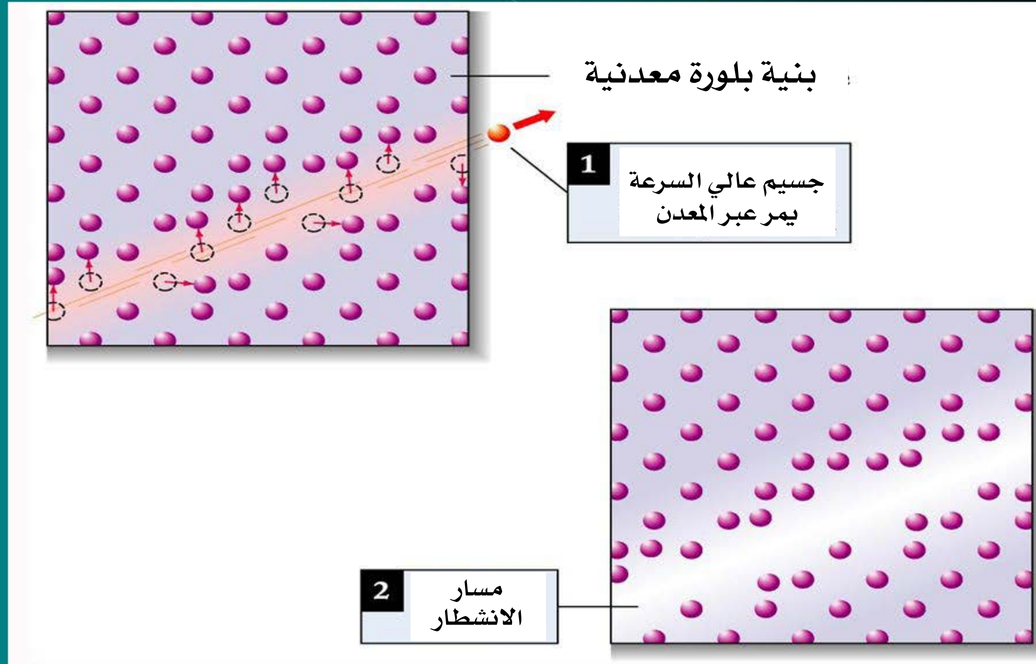
على الرغم من أنه أمكن التوصل إلى تقديرات دقيقة لأعمار مختلف أقسام العمود الجيولوجي، فإن هذا لا يعني أن الأمر يخلو من صعوبات. تكمن الصعوبة الأولى في وضع تقدير دقيق للعمر في أنه لا يمكن تقدير عمر الصخور باستخدام الطرق الإشعاعية، وذلك يرجع إلى أنه لكي تكون عملية التقدير دقيقة، فلا بد أن تكون كل المعادن الموجودة في الصخر قد تكونت في وقت واحد. ولهذا لسبب، فإننا نستخدم النظائر المشعة لتحديد متى تبلورت المعادن المكونة للصخر الناري، ومتى وصلت درجة الحرارة والضغط إلى الحد، الذي يساعد على تكوين معادن جديدة في الصخر المتحول. أما الصخور الرسوبية فإنها نادراً ما يمكن تحديد عمرها باستخدام المواد المشعة مباشرة. وعلى الرغم من أن الصخور الرسوبية الفتاتية قد تحتوي على حبيبات بها نظائر مشعة، فإن عمر الصخر نفسه لا يمكن تحديده بطريقة دقيقة؛ لأن الحبيبات المكونة للصخر لا تنتمي إلى عمره نفسه. كما أن الرواسب تأتي من صخور مختلفة العمر بالتجوية. كما أن الرواسب تأتي من الصخور المتحولة قد يصعب تفسيرها؛ لأن عمر معدن معين في الصخر المتحول لا يمثل بالضرورة عمر تكوين الصخر الأصلي، بل قد يمثل مرحلة من مراحل التحول اللاحقة. أما إذا كان الصخر الرسوبي لا يحتوي على مواد مشعة مناسبة لتقدير عمره المطلق، فإنه يتحتم على الجيولوجي ربط الطبقات الرسوبية بأجسام نارية يمكن تحديد أعمارها المطلقة، حيث تكون الطبقات الرسوبية أقدم عمراً من الجسم الناري القاطع له، كما تكون أحدث عمراً من الأجسام النارية غير المتأثرة بها في التتابع نفسه. ومن مثل هذا النوع من الشواهد، يمكن للجيولوجي أن يقدر عمر الصخور الرسوبية تقديراً مطلقاً. كما يتضح مدى أهمية الربط بين الدراسات المعملية والمشاهدات الحقلية عند القيام بهذه المهمة.

طـرق أخـرى لتحديـد العمـر الجيولوجـي

تحديد العمر باستخدام مسارات الانشطار

يمكن استخدام مسارات الانشطار Fission Track Dating كطريقة حديثة لتقدير العمر المطلق ثبت نجاحها. وهي عبارة عن ندوب تشبه الأنفاق الدقيقة للغاية التي لا ترى إلا تحت تكبيرات عالية في بعض بلورات المعادن. وتنتج هذه المسارات عندما تنطلق بعض الجسيمات عالية الطاقة من نويات ذرات اليورانيوم 238 أثناء الانشطار اللحظي إلى نواتين أو أكثر أخف وزناً، وبالإضافة إلى بعض الجسيمات النووية. وتنطلق الجسيمات داخل تركيب الشبكة البلورية للمعدن تاركة بصمة للمسار الذي سلكته، والذي يكون سعته ذرات قليلة. ويكون المعدل الطبيعي لإنتاج مسارات الانشطار في ذرات اليورانيوم شديد البطء، ويحدث بمعدل ثابت. وبحساب عدد مسارات الانشطار يمكن تحديد عدد الذرات التي اضمحلت فعلاً، ويتعرض البلورة لمجال نيوتروني يحدث اضمحلال لبقية الذرات، ثم يعاد عد مسارات الانشطار مرة ثانية، وبإيجاد النسبة بين الذرات الوليدة الأولى والذرات الولودة يمكن حساب العمر المطلق. ويبدو أن معادن، مثل الأباتيت والزركون والسفين تعطي نتائج جيدة، كما أن هذه الطريقة تستخدم لتحديد أعمار عينات يقل عمرها عن عدة قرون من السنين، كما تستخدم لتحديد أعمار صخور يصل عمرها إلى عدة بلايين من السنين، إلا أنها أكثر استخداما لتقدير عمر عينات تتراوح بين 40000 سنة ومليون سنة مضت، وهي فترة زمنية لا تستخدم فيه التقنيات الأخرى بصورة عملية. ولكن هذه الطريقة كغيرها من طرق قياس العمر المطلق لها عوامل محددة. فدرجات الحرارة العالية يمكن أن تؤدي إلى اختفاء المسارات، كما يمكن أن يؤدي قذف الأشعة الكونية إلى زيادة سرعة انشطار، مما يؤدي إلى تقديرات خاطئة.



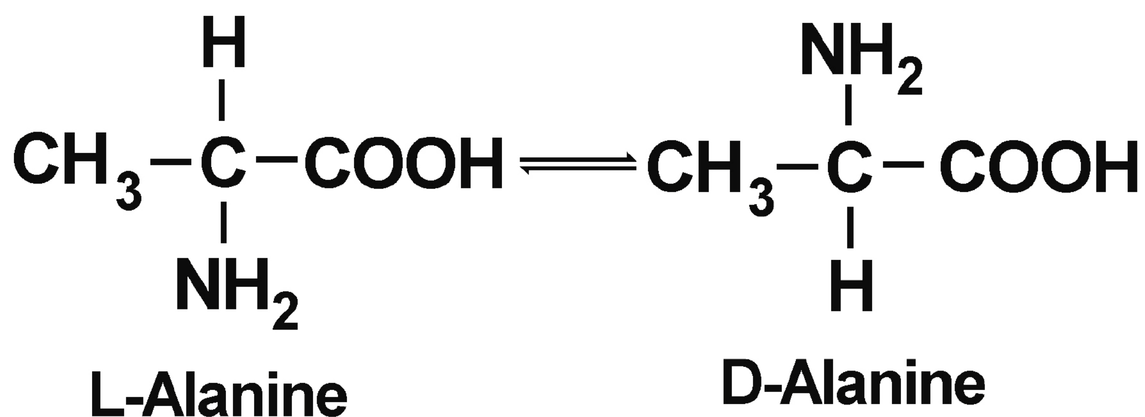


استخدام مسارات الانشطار كطريقة حديثة لتقدير العمر المطلق

تحديد العمر باستخدام الأحماض الأمينية

إن تحديد العمر المطلق باستخدام الأحمض الأمينية Amino Acids Dating يعتبر طريقة أخرى حديثة، تعتمد على تحليل نسبة الحمض الأميني D إلى الحمض الأميني L في عظام حفريات ومواد أصداف العصر الرابع Quaternary، حيث ثبت جدواها. وقد أثبتت الأبحاث التي أجريت في سبعينيات القرن الماضي أن عملية تدعى تفاعل ريسمة الحمض الأميني Amino Acids Racemization يمكن استخدامها بمحاذير معينة، عند تحديد عمر مادة هيكلية، حيث إن الأحماض الأمينية المعروفة بـ L-Amino Acids توجد فقط في بروتينات الكائنات الحية. وعندما يموت الكائن وتمضي فترة زمنية تتحول هذه L-Amino Acids إلى الأحماض الأمينية غير البروتينية والمعروفة بـ D-Amino Acids خلال عملية تعرف بالريسمة Racemization. وتزيد بثبات نسبة D-Amino Acids إلى L-Amino Acids في المادة الهيكلية مع الزمن حتى تصل هذه النسبة L/D إلى 1.0. أما إذا زادت فتصبح النسبة زائفة؛ لأنه عكس سلاسل الاضمحلال الإشعاعي فإن التفاعل يكون عكسياً. وبتحديد المدى الذي وصلت إليه عملية الريسمة في عينة المادة الهيكلية، يمكن تحديد عمرها، آخذين في الاعتبار أنه يمكن معايرة العينة بعينة أخرى محددة العمر سلفاً.

وبمقارنة طريقة الريسمة هذه بطريقة الكربون المشع، يتضح أننا نحتاج في هذه الطريقة إلى مقدار أقل من المادة العضوية، كما تطبق في مجالات أوسع من طريقة الكربون المشع. فهي تطبق في تحديد أعمار الحفريات البشرية المبكرة والشرفات البحرية، التي تكونت خلال مئات الآلاف من السنين الأخيرة.



طريقة تحديد العمر المطلق باستخدام الأحماض الأمينية التي تعتمد على تحليل نسبة الحمض الأميني -D إلى الحمض الأميني -L

التلألـؤ الحـــراري Thermoluminescence

التلألـؤ (اللمعـان الحـراري): التأريـخ بالنظائـر المشـعة ليـس الطريقـة الوحيـدة للعلمـاء لتحديـد الأعمـار الرقميـة. يقيـس التأريـخ اللامـع الوقـت المنقضـي منـذ أن تعرضـت بعـض معـادن السـيليكات، مثـل الرواسـب الخشـنة لمعـادن السـيليكات، لآخـر مـرة للضـوء أو الحـرارة علـى سـطح الأرض. تتعـرض جميـع الرواسـب المدفونـة للإشـعاع مـن إشـعاع الخلفيـة الطبيعـي مـن عمليـة التحلـل الموصوفـة أعـلاه. بعـض هـذه الإلكترونـات محاصـرة في الشـبكة البلوريـة لمعـادن السـيليكات مثـل الكوارتـز. عنـد تعرضهـا علـى السـطح، تطلـق الأشـعة فـوق البنفسـجية والحـرارة المنبعثـة مـن الشـمس هـذه الإلكترونـات، ولكـن عندمـا تُدفـن المعـادن علـى بُعـد بضـع بوصـات تحـت السـطح، تُحبـس الإلكترونـات مـرة أخـرى. يتـم تحليـل عينـات مـن الرواسـب الخشـنة التـي تـم جمعهـا علـى بُعـد بضعـة أقـدام فقـط مـن السـطح عـن طريـق تحفيزهـا بالضـوء في المختبـر. يطلـق هـذا التحفيـز الإلكترونـات المحاصـرة كفوتـون ضوئـي يسـمى اللمعـان. يشـير مقـدار اللمعـان المنطلـق إلـى المـدة التـي تـم فيهـا دفـن الرواسـب. يعـد التأريـخ اللامـع مفيـدًا فقـط في تحديـد تاريـخ الرواسـب الصغيـرة التـي يقـل عمرهـا عـن مليـون عـام.

Thermoluminescence تقنية اللمعان الحراري

IRRADIATION التشعيع

Local ionizing radiation introduces electrons to the crystal lattice, some of which are trapped at imperfections and 'stored'. Sources: ambient ^{40}K, ^{238}U, ^{232}Th...

STORAGE التخزين

Some electrons are 'trapped', as they lack sufficient energy to escape the lattice.

EVICTION الإخلاء

Electrons are provided the means to escape from an outside stimulus (eg. UV wavelengths or heat).

The amount of thermoluminescence from a heated sample is used to determine the number of trapped electrons resulting from the absorption of alpha radiation.

Quartz Structure (looking down c-axis)

يوضح الرسم البياني تفاصيل تقنية Thermoluminescence التلألؤ الحراري، ويظهر الإلكترونات المحاصرة.

أوجه الشبه والاختلاف بين العمر النسبي والعمر المشع المطلق

أولاً : أوجه التشابه بين العمر النسبي والعمر المشع المطلق

- التأريخ النسبي والتأريخ الإشعاعي طريقتان لتحديد عُمر الأحافير والصخور.
- تعتبر دراسة الأحافير مهمة لتحديد نوع الكائن الذي يمثله، وكيفية معيشته، وكيفية الحفاظ عليه على سطح الأرض على مدار 4.6 مليار سنة الماضية.

ثانياً : أوجه الاختلاف بين العمر النسبي والعمر المشع المطلق

التعريف

يشير التأريخ النسبي إلى علم تحديد الترتيب النسبي للأحداث الماضية، دون تحديد العمر المطلق بالضرورة. من ناحية أخرى، يشير التأريخ الإشعاعي إلى التقنية المستخدمة لتأريخ المواد مثل الصخور أو الكربون، حيث تم دمج الشوائب النذرة والمشعة بشكل انتقائي أثناء تكوينها.

الدلالة

يحدد التأريخ النسبي العمر النسبي لطبقات الصخور وفقًا لعمقها النسبي. ومع ذلك، يحدد التأريخ الإشعاعي العمر المطلق باستخدام المنتجات المتحللة للنظائر المشعة الطبيعية.

الدقة

الدقة في العمر المشع أعلى منها في العمر النسبي.

الكمي - الكيفي

العمر المضبوط يمثل قياسات كمية بينما العمر النسبي يمثل قياسات عينية.

التكلفة والزمن

العمر المضبوط أعلى تكلفة ويأخذ وقتاً أطول، بينما العمر النسبي أقل تكلفة ويأخذ وقتاً أكثر.

المبـــــدأ

في الصخور الرسوبية غير المشوهة، تكون كل طبقة سفلية أقدم من تلك الموجودة فوقها (قانون تعاقب الطبقات)، وبالمقارنة فإن التأريخ الإشعاعي يقيم تأثيرات النشاط الإشعاعي على تراكم الإلكترونات في مصائد في التركيب البلوري للمعدن.

التقنيـــات

أيضًا، يعتمد التأريخ النسبي على مبدأ الأفقية الأصلية، ومبدأ التراكب، ومبدأ العلاقات المتقاطعة، ومبدأ الوتيرة الواحدة، ومبدأ التعاقب الأحفوري، بينما الرنين المغزلي للإلكترون والتلألؤ الحراري ومسارات الانشطار هما التقنيات المستخدمة في التأريخ الإشعاعي.

نـوع المـواد المـراد تأريخها

يعد التأريخ النسبي مُهماً لتاريخ الصخور الرسوبية والبركانية بينما يعد التأريخ الإشعاعي مُهماً لتأريخ الأحافير والصخور.

الأهميـــة

يحدد التأريخ النسبي العمر فيما يتعلق بعمر الطبقات العليا والسفلى بطريقة نسبية. بينما يحدد التأريخ الإشعاعي العمر المطلق كقيمة عددية.

باختصار، التأريخ النسبي هو طريقة تحديد العمر النسبي للأحفورة. بشكل عام، يعتمد ذلك على عمر الطبقتين العلوية والسفلية لتسلسل غير مشوه من الصخور الرسوبية.

في المقابل، التأريخ الإشعاعي هو طريقة لتحديد العمر المطلق للحفرة. ومع ذلك، فإنه يستخدم بقايا الآثار المشعة. أيضًا، التقنيات المتضمنة في العملية هي الرنين المغزلي للإلكترون أو اللمعان الحراري أو مسار الانشطار لذلك، فإن الاختلاف الرئيسي بين التأريخ النسبي والتأريخ الإشعاعي المضبوط هو مبدأ ونوع التأريخ.

المراجــع العربيـــة

البيروني، أبو الريحان، تحديد نهايات الأماكن لتصحيح مسافات المساكن، تحقيق: ب. بولجاكوف، نشرها معهد المخطوطات العربية في مجلته، المجلد 8، 1962م، وقد أعاد معهد المخطوطات العربية بجامعة فرانكفورت بإعادة نشرها ضمن سلسلة الجغرافيا الإسلامية المجلد 25، 1992م.

ابن سينا، أبو علي، الشفاء (الطبيعيات)، تحقيق: محمد رضا مدور، إمام إبراهيم أحمد، الهيئة المصرية العامة للكتاب، القاهرة، 1980م.

أبو حامد الغرناطي، محمد بن عبد الرحيم، تحفة الألباب ونخبة الإعجاب، مخطوطة مكتبة غوته، برلين، رقم (Ms. Orient. A 1502).

جريبين، جون، الحياة السرية للشمس، ترجمة: لبنى الريدي، ط1، سلسلة الألف كتاب الثاني، الهيئة المصرية العامة للكتاب، القاهرة، 2008م.

رونــــن، كولين، تاريخ عمر الأرض، مجلة آفاق علمية، العدد 24، مارس-إبريل، تصدر عن مؤسسة عبد الحميد شومان، عمّان، 1990م.

ضـــاي، ميادة، الملامح الهندسية لعلم الأراضة في التراث العربي، رسالة ماجستير غير منشورة، معهد التراث العلمي العربي، جامعة حلب، حلب، 1994م.

العمري، ابن فضل الله، مسالك الأبصار في ممالك الأمصار، تحقيق: كامل سلمان الجبوري ومهدي النجم، ط1، ج 4، دار الكتب العلمية، بيروت، 2010م.

العمـــري، عبدالله محمد. الجيوفيزياء التطبيقية. جامعة الملك سعود. فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية. ردمك: 5-981-507-603-978 , 2021 م.

الفنـدي، محمد جمال وأحمد، إمام إبراهيم، البيروني، سلسلة أعلام العرب (77)، دار الكاتب العربي، القاهرة، 1968م.

القزويني، زكريا بن محمد، عجائب المخلوقات وغرائب الموجودات، تحقيق ومراجعة: سعد كريم الفقي، وكرم السيد الأزهري، دار ابن خلدون، الإسكندرية، (د.ت).

المسعودي، أبو الحسن، أخبار الزمان، ط2، المكتبة الحيدرية، النجف الأشرف، 1966م.

يعقوب، مصطفى، الأشجار المتحجرة، مجلة القافلة، يوليه/أغسطس، العدد3، المجلد 44، الظهران، 1995م.

المراجع الأجنبية

Braterman, Paul S., (2013), How Science Figured Out the Age of Earth, Scientific American, October 20.

Dalrymple, G. Brent (2001). "The age of the Earth in the twentieth century: a problem (mostly) solved". Special Publications, Geological Society of London. 190 (1): 205–221.

Knell, S. J. & Lewis, C. L. E., (2001), Age of the Earth, The Geological Society of London, Cambrian Press, Aberystwyth.

O'Hara, Kieran D., (2018), A Brief History of Geology, University of Cambridge, Cambridge.

المراجع على الشبكة (الإنترنت)

https://en.wikipedia.org/wiki/Nebular_hypothesis

https://en.wikipedia.org/wiki/Trilobite

https://en.wikipedia.org/wiki/Eurypterid

https://en.wikipedia.org/wiki/Steppe_mammoth



موسوعة العمري
في علوم الأرض



أ.د. عبد الله بن محمد العمري

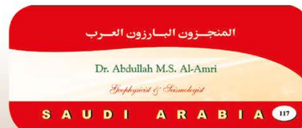
www.alamrigeo.com E.mail : alamri.geo@gmail.com Cell : +966505481215

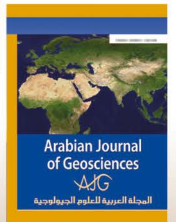




المناصب الإدارية والفنية	❖ دكتوراه في الجيوفيزياء عام 1990 م من جامعة مينيسوتا - أمريكا. ❖ المشرف على مركز الدراسات الزلزالية- جامعة الملك سعود. ❖ المشرف على كرسي استكشاف الموارد المائية في الربع الخالي. ❖ المشرف على مركز الطاقة الحرارية الارضية بجامعة الملك سعود. ❖ رئيس الجمعية السعودية لعلوم الأرض. ❖ رئيس قسم الجيولوجيا والجيوفيزياء - جامعة الملك سعود. ❖ مؤسس ورئيس تحرير المجلة العربية للعلوم الجيولوجية AJGS. ❖ رئيس فريق برنامج زمالة عالم مع جامعة أوريغون الحكومية الأمريكية ومعهد ماكس بلانك الألماني.
الاستشارات والعضويات	• مستشار مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية. • مستشار هيئة المساحة الجيولوجية وهيئة المساحة العسكرية والدفاع المدني. • مستشار مدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة. • مستشار هيئة الرقابة النووية والإشعاعية. • باحث رئيس في عدة مشاريع بحثية مدعمه من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية وشركة أرامكو. • باحث رئيس في مشاريع مدعمه من وزارة الطاقة الأمريكية وجامعة كاليفورنيا ومعمل ليفرمور الأمريكي LLNL. • عضو الجمعية الأمريكية للزلازل. • عضو الاتحاد الأمريكي للجيوفيزياء. • عضو الاتحاد الأوروبي للجيولوجيين. • عضو لجنة كود البناء السعودي وعضو المنتدى الخليجي للزلازل GSF. • عضو لجنة تخفيف مخاطر الزلازل في دول شرق البحر الأبيض المتوسط RELEMR. • باحث رئيسي ومشارك في مشاريع بحثية مع جامعات الاباما وبنسلفانيا وأوريغون الامريكية. • ضمن قائمة (المنجزون البارزون العرب) من قبل منظمة ريفاسيمنتو الدولية. • ضمن قائمة Who's Who في قارة آسيا للتميز العلمي. • ضمن قائمة Who's Who في العالم للإسهامات العلمية.
النشر العلمي والتأليف	❖ نشر أكثر من **200** بحثاً علميًا في مجلات محكمة. ❖ ألف **35** كتاباً علمياً. ❖ أصدر موسوعة رقمية في علوم الأرض من **14** مجلداً و**107** ملفات علمية.
المشاريع البحثية	❁ أنجز **40** مشروعاً بحثياً محلياً و **16** مشروعاً بحثياً دولياً و **74** تقريراً فنياً.
المؤتمرات والندوات	❁ شارك في أكثر من **125** مؤتمراً محلياً ودولياً و **75** ندوة وورشة عمل متخصصة.
التعاون الدولي	❁ باحث رئيسي في **13** مجموعة عمل أمريكية وألمانية.
الجوائز	❖ حصل على جائزة المراعي للإبداع العلمي عام 2005 م. ❖ حصل على جائزة التميز الذهبي من مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم و التقنية عام 2006 م. ❖ حصل على جائزة أبها التقديرية للإسهامات العلمية عام 2007م. ❖ حصل على جائزة جامعة الملك سعود للتميز العلمي عام 2013 م. ❖ حصل على جائزة الاتحاد الامريكي للجيوفيزياء للتعاون الدولي والنشاط البحثي عام 2013 م. ❖ حصل على جائزة جامعة السلطان قابوس للإسهامات العلمية عام 2013 م. ❖ حصل على جائزة الملك سعود لإدراج المجلة العربية للعلوم الجيولوجية في قائمة الـ ISI. ❖ حصل على جائزة أفضل رئيس تحرير مجلة علمية عام 2017 من الناشر الألماني SPRINGER. ❖ حصل على جائزة ألبرت نيلسون ماركيز للإنجاز مدى الحياة عام 2018 من منظمة Who's Who العالمية.
دروع التكريم	❖ حصل على **85** درعاً تكريمياً وشهادات تقدير من المملكة وعمان والكويت والإمارات والأردن ومصر وتونس والجزائر وألمانيا وأمريكا.

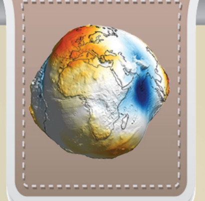









موسوعة العمري في علوم الأرض
Al-Amri's Encyclopedia of Earth Sciences



1 تقدير عمر الأرض

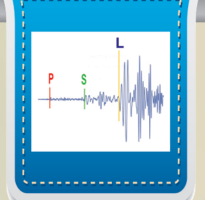
2 شكل الأرض وحركاتها

3 الجاذبية الأرضية وتطبيقاتها

4 التركيب الداخلي للأرض

5 المعادن والتعدين

6 المد والجزر




7 موجات التسونامي

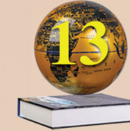
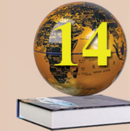
8 الزلازل والتفجيرات

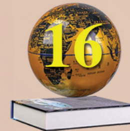
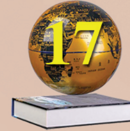
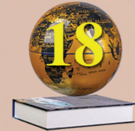
9 تقييم مخاطر الزلازل

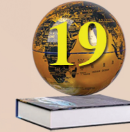
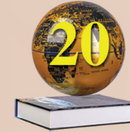
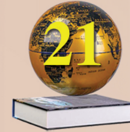
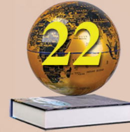
10 البراكين وسبل مجابهتها

11 جيولوجية القمر

12 الأغلفة المحيطة بالأرض



13 المشاكل البيئية وحلولها

14 التغيرات المناخية والاحتباس الحراري

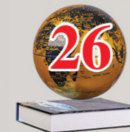
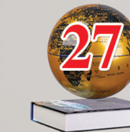
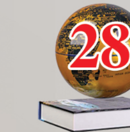
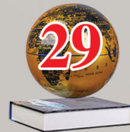
15 التشجير التحديات والحلول

16 الانزلاقات والانهيارات والفيضانات

17 الأمطار السيول والسدود

18 التصحر والجفاف



19 مستقبل الطاقة في عالمنا

20 الطاقة الحرارية الأرضية

21 هل انتهى عصر النفط؟

22 الجيوفيزياء النووية

23 الجيولوجيا الطبية

24 دليل كتابة الرسائل والنشر العلمي



25 321 سؤال وجواب في تطور الأرض

26 325 سؤال وجواب في علم الصخور والجيوكيمياء

27 358 سؤال وجواب في الثروات الطبيعية

28 380 سؤال وجواب في المخاطر الجيولوجية

29 303 سؤال وجواب في علم الزلازل والزلزالية الهندسية

30 300 سؤال وجواب في الجيوفيزياء التطبيقية



www.alamrigeo.com
